



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO
DE UNA ESTACIÓN DE MÁQUINA SERIGRÁFICA TEXTIL
AUTOMATIZADA PARA LA EMPRESA ORTEGA DE LA
BARRA”**

AUTOR: CÓRDOVA ORTEGA, RAÚL ESTEBAN

DIRECTOR: ING. IBARRA JÁCOME, ALEXANDER

SANGOLQUÍ

2016



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA ESTACIÓN DE MÁQUINA SERIGRÁFICA TEXTIL AUTOMATIZADA PARA LA EMPRESA ORTEGA DE LA BARRA" realizado por el señor Raúl Esteban Córdova Ortega, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor Raúl Esteban Córdova Ortega para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, Abril 26 del 2016

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to be 'A. Ibarra Jácome'.

ING. ALEXANDER IBARRA JÁCOME
DIRECTOR



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Raúl Esteban Córdova Ortega, con cédula de identidad N° 1713471330, declaro que este trabajo de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA ESTACIÓN DE MÁQUINA SERIGRÁFICA TEXTIL AUTOMATIZADA PARA LA EMPRESA ORTEGA DE LA BARRA" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de tercero considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, Abril 26 del 2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Raúl Esteban Córdova Ortega', written over a horizontal line.

Raúl Esteban Córdova Ortega

C.C. 1713471330



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, Raúl Esteban Córdova Ortega autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA ESTACIÓN DE MÁQUINA SERIGRÁFICA TEXTIL AUTOMATIZADA PARA LA EMPRESA ORTEGA DE LA BARRA" cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, Abril 26 del 2016

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'R' followed by a series of loops and a horizontal line, is positioned above the printed name.

Raúl Esteban Córdova Ortega

C.C. 1713471330

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación se la dedico a todos los seres importante de mi vida que de una u otra manera he aprendido algo significativo en mi vida, que gracias a todos soy la persona que soy, y en especial para:

Para mi hijo Theo mi mayor felicidad, que este esfuerzo sea un ejemplo para él y motivación. Para mi querida mujer Estefanía por ser mi fiel compañía.

Para mi madre y mi padre por apoyarme con sus diálogos, consejos y motivaciones, además de su inigualable ejemplo de trabajo y honra.

Para mis hermanos Martín y Verónica, que son con los que he crecido y han sido parte de mi formación.

Mis abuelos y toda mi familia por su cariño, por extenderme su mano y apoyarnos incondicionalmente.

AGRADECIMIENTO

Este proyecto de investigación es resultado del esfuerzo y dedicación. Agradezco a quienes a lo largo de este tiempo han puesto a prueba mis capacidades y conocimientos en el desarrollo de mi formación.

Agradezco primeramente a Dios por haber guiado mi camino y brindarme la fortaleza que he necesitado para poder culminar mis metas.

A mis padres por haber estado conmigo en todos los momentos que necesitaba, por darme la sabiduría y muchas enseñanzas al culminar una etapa más de mi vida estudiantil, por la confianza que han puesto en mí para mi formación profesional.

A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias a su paciencia y en especial agradecer a la prestigiosa Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, la cual me abrió sus puertas, para prepararme para un futuro competitivo con una gran formación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
RESUMEN.....	xix
CAPÍTULO 1	1
1. GENERALIDADES	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. ALCANCE	6
1.4.1. COMPONENTES MECÁNICOS.....	6
1.4.2. COMPONENTES ELECTRONICOS/ELECTRICOS.....	8
1.4.3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL	8
1.4.4. SOFTWARE PARA IMPLEMENTACIÓN, ANÁLISIS Y	
SIMULACIÓN	10
1.5. OBJETIVOS	10
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	11
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
CAPÍTULO 2.....	12
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. SERIGRAFÍA	12
2.1.1 USOS COMERCIALES DE LA SERIGRAFÍA	13
2.1.2. NUEVOS DESARROLLOS.....	15
2.1.3. LIMITACIONES DE LA SERIGRAFIA	15
2.1.4. ELEMENTOS Y MATERIALES	16
2.1.4.1. EL MARCO	16
2.1.4.2. EL TEJIDO.....	22

2.1.4.3. EL RACLE.....	32
2.1.4.4. TINTAS Y MEDIOS AUXILIARES.....	36
2.1.4.5. EL CLISADO	37
2.1.5 PROCESO DE IMPRESIÓN SERIGRÁFICA TEXTIL	42
2.1.5.1. OPERACIONES PREVIAS PARA IMPRESIÓN.....	42
2.1.5.2. EJECUCIÓN DEL PROCESO DE IMPRESIÓN.....	45
2.1.5.3. NIVELACIÓN DE TINTA	46
2.1.5.4. DEFECTOS DE IMPRESIÓN	49
2.1.6. DISPOSITIVOS DE IMPRESION	50
2.1.6.1. DISPOSITIVOS DE IMPRESIÓN MECÁNICOS	50
2.1.6.2. DISPOSITIVOS DE IMPRESIÓN AUTOMÁTICOS.....	51
CAPÍTULO 3.....	56
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA MÁQUINA SERIGRÁFICA AUTOMATIZADA.....	56
3.1. DISEÑO MECÁNICO	56
3.1.1 ESQUEMA DE LA MÁQUINA SERIGRÁFICA AUTOMATIZADA.....	56
3.1.2 ANÁLISIS DE CARGAS ESTÁTICAS.....	57
3.1.3. DISEÑO DEL MECANISMO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA MOTOR – ENGRANE	64
3.1.3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE REDUCCION PIÑÓN - ENGRANE	65
3.1.4. DISEÑO DE LOS BRAZOS GIRATORIOS.....	80
3.1.5. DISEÑO DEL EJE	84
3.1.6. DISEÑO DE LA BASE CILINDRICA.....	88
3.1.7. DISEÑO DEL BRAZO DE IMPRESIÓN.....	91
3.1.8. SELECCIÓN DEL RODAMIENTO.....	94
3.1.9. DISEÑO DEL HUSILLO DE BOLAS.....	97
3.1.10. SELECCIÓN DEL ACTUADOR LINEAL NEUMÁTICO	104

3.2. DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO	113
3.2.1. SELECCIÓN DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS	113
3.2.1.1. SELECCIÓN DEL MOTOR PASO A PASO	113
3.2.1.2. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL STEPPER DRIVER	115
3.2.1.3. SELECCIÓN DE LA VÁLVULA SOLENOIDE	117
3.2.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	120
3.2.2.1. SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE CONTROL.....	120
3.2.2.2. MODELAMIENTO DEL CONTROLADOR	123
3.2.2.3. SELECCIÓN DEL CONTROLADOR.....	130
3.2.2.4. SELECCIÓN SENSOR DE POSICIÓN ANGULAR.....	132
3.2.2.5. SELECCIÓN SENSOR DE POSICIÓN LINEAL.....	135
3.2.2.6. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL PROVENIENTE DEL ENCODER INCREMENTAL	139
3.2.3. SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN	142
3.2.3.1. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LOS ACTUADORES.....	142
3.2.3.2. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE SENSORES Y AMPLIFICADORES	143
3.2.3.3. CIRCUITO DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGAS	144
3.3. SELECCIÓN DEL SOFTWARE PARA DESARROLLO DEL HMI	146
3.4. IMPLEMENTACION DE LA MÁQUINA SERIGRÁFICA AUTOMATIZADA	149
3.4.1. IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA.....	149
3.4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE.....	152
3.4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE	158

CAPÍTULO 4.....	180
4. PRUEBAS Y RESULTADOS.....	180
4.1. DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	180
4.2. PRUEBAS MECÁNICAS.....	181
4.2.1. PRUEBA 1: CAPACIDAD DE LA ESTRUCTURA	181
4.2.2. PRUEBA 2: CAPACIDAD DE LOS BRAZOS GIRATORIOS.....	181
4.2.3. PRUEBA 3: DIENTES DE ENGRANES	182
4.2.4. PRUEBA 4: ACOPLÉ ENTRE EL EJE DEL MOTOR Y EJE DEL HUSILLO DE BOLAS	182
4.2.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS	182
4.3. PRUEBAS ELÉCTRICAS Y ELECTRÓNICAS	183
4.3.1. PRUEBA 1: FUNCIONAMIENTO DEL ENCODER INCREMENTAL	183
4.3.2. PRUEBA 2: FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR INFRARROJO Y EL MOTOR PARA EL MOVIMIENTO DEL RACLE.....	184
4.3.3. PRUEBA 3: FUNCIONAMIENTO DE LA VÁLVULA SOLENOIDE	184
4.3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ELECTRICAS Y ELECTRONICAS.....	184
4.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA.....	185
4.4.1. PRUEBA 1: IMPRESIÓN SOBRE CAMISETAS.....	185
4.4.2. PRUEBA 2: FUNCIONAMIENTO DEL HMI	189
4.4.3. FUNCIONAMIENTO DE LA IMPRESIÓN POR ETAPAS.....	190
CAPÍTULO 5.....	197
5. ANÁLISIS DE COSTOS.....	197
5.1 COSTOS DE MATERIA PRIMA	197

5.2 COSTOS DE HERRAMIENTAS, MATERIALES Y EQUIPOS	198
5.3 COSTOS DE MANO DE OBRA.....	200
5.4 COSTO TOTAL	201
CAPÍTULO 6.....	203
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	203
6.1. CONCLUSIONES	203
6.2. RECOMENDACIONES	204
BIBLIOGRAFÍA.....	206

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Maquina Serigráfica Manual Textil Tipo Pulpo de la Empresa.....	1
Figura 2 Maquina Serigráfica Textil Automatizada Sportsman E	4
Figura 3 Componentes mecánicos de la Máquina Serigráfica Textil Automatizada tipo Pulpo	6
Figura 4 Componentes electrónicos de la Máquina Serigráfica Textil Automatizada tipo Pulpo	8
Figura 5 Sistema de Control en lazo cerrado.....	9
Figura 6 Componentes del sistema de control de la Máquina Serigráfica Textil Automatizada tipo Pulpo.....	9
Figura 7 Proceso Básico de Impresión Serigráfica	12
Figura 8 Cuatro procedimientos de impresión	13
Figura 9 Impresión serigráfica sobre camiseta	14
Figura 10 Marco de Madera para Serigrafía	17
Figura 11 Tipo de Junta Fuerte en Marco	18
Figura 12 Marco de Acero para Serigrafía.....	19
Figura 13 Secciones Transversales de marcos metálicos	20
Figura 14 Reserva de Tinta dentro de un Marco Serigráfico	21
Figura 15 Superficie aprovechable del formato de marco.....	22

Figura 16 Comparación de la abertura de malla en tejidos.....	23
Figura 17 Gama de posibles lineaturas de tejido.....	24
Figura 18 Distintos tramas de tejido con el mismo número de hilos	25
Figura 19 Tensado manual de pantalla para serigrafía.....	30
Figura 20 Tensor de barra rodante para pantallas serigráficas	30
Figura 21 Tensores mecánicos de pantallas serigráficas	31
Figura 22 Tensor neumático de pantallas serigráficas.....	31
Figura 23 Tensado de marco maestro de serigrafía	32
Figura 24 Raqueta de metal	33
Figura 25 Raqueta con hoja recambiable	33
Figura 26 Raqueta con hoja fija	33
Figura 27 Rasqueta para tres colores.....	33
Figura 28 Racle de filo rectangular	34
Figura 29 Racle de filo rectangular y cantos romos	35
Figura 30 Racle de filo redondeado	35
Figura 31 Racle de filo en bisel.....	35
Figura 32 Racle de filo en doble bisel	36
Figura 33 Esquema para insolar pantallas sensibilizadas	41
Figura 34 Esquema de las variables influyentes en la impresión serigráfica.....	42
Figura 35 Colocación de topes de marginación.....	43
Figura 36 Fuera de contacto.....	44
Figura 37 Separación de la rasqueta con respecto a la pantalla.	45
Figura 38 Inundación	46
Figura 39 Impresión	46
Figura 40 Visualización de tintas de impresión niveladas.....	47
Figura 41 Propiedades deseadas del borde de tinta.....	47
Figura 42 Nivelación de tinta según velocidad de maquina variable y recorrido de banda constante	48
Figura 43 Nivelación de tinta según velocidad de máquina constante y recorrido de banda variable	48
Figura 44 Impresora de superficie de mesa.....	50

Figura 45 Mesa de 4 Colores Impresora Serigráfica.....	51
Figura 46 Impresora Diamondback.....	52
Figura 47 Impresora Sportsman serie EX.....	54
Figura 48 Esquema general de la estación de la máquina serigráfica automatizada	56
Figura 49 Diagrama de cuerpo libre de los brazos giratorios.....	57
Figura 50 Diagrama de cuerpo libre del engranaje	58
Figura 51 Diagrama de cuerpo libre del eje del engrane.	59
Figura 52 Diagrama de cuerpo libre del rodamiento.	60
Figura 53 Diagrama de cuerpo libre de la base cilíndrica	60
Figura 54 Diagrama de cuerpo libre de la base principal de 3 patas	61
Figura 55 Diagrama de cuerpo libre del brazo de impresión.	62
Figura 56 Diagrama de cuerpo libre del eje del husillo de bolas.....	63
Figura 57 Diagrama de dureza brinell vs esfuerzo admisible para aceros de templado total.....	69
Figura 58 Tabla de diseño de engranes en CAD	69
Figura 59 Factores dinámico Kv y Cv de AGMA.....	73
Figura 60 Diagrama del factor de geometría I para engranes rectos con respecto a la relación de engranes.....	78
Figura 61 Ensamble de marcos, brazos y camiseteros	80
Figura 62 Diagrama de fuerzas cortantes y momento flector máximo en los brazos giratorios	83
Figura 63 Graficas de los Diagramas de fuerza cortante y de momento flector en el eje.....	85
Figura 64 Diagrama de sensibilidad a la muesca para aceros.	87
Figura 65 Factor de concentración de esfuerzos geométrico Kt para una flecha con un filete de hombro a flexión.	87
Figura 66 Gráficas de los Diagramas de fuerza cortante y de momento flector en el soporte del brazo de impresión.	93
Figura 67 Cálculo del valor del factor de carga a la fatiga en el software de la SKF.....	95

Figura 68 Extremo mecanizado estándar para diámetro nominal de Eje ≥ 16 mm para PND Tipo 2A y Tipo 4A	100
Figura 69 Cilindro de simple efecto tipo normalmente dentro	105
Figura 70 Cilindro de doble efecto	105
Figura 71 Cilindro neumático de doble efecto Uxcell MAL 25 x 50	108
Figura 72 Diagrama de espacio – fase del cilindro neumático.....	109
Figura 73 Circuito neumático del brazo de impresión	109
Figura 74 Compresor neumático Shimaha Modelo W-2006 A.....	113
Figura 75 Motor paso a paso Nema 23 23HS45-4204S	114
Figura 76 Toshiba TB6560 AHQ.....	116
Figura 77 Diagrama de bloques del control del motor	123
Figura 75 Grafica del lugar de las raíces del sistema	124
Figura 78 Determinación del cero del compensador PD.....	126
Figura 79 Diagrama de bloques del controlador PD del motor paso a paso 23HS45-4204S	128
Figura 80 Gráfica de la repuesta a la entrada escalón unitario del sistema de control diseñado	129
Figura 81 Gráfica de la respuesta a la entrada escalón unitario del sistema de control sintonizado	130
Figura 82 Placa Arduino MEGA 2560	132
Figura 83 Encoder incremental E6C2-CWZ6C de Singswise	134
Figura 84 Diagrama de la salida de voltaje del sensor Sharp GP2Y0A21YK0F	138
Figura 85 Circuito amplificador de señal modo corte-saturación	139
Figura 86 Visualización de las señales de entrada y salida del circuito amplificador modo corte - saturación.....	142
Figura 87 Fuente de voltaje 110 VAC a 24 VDC- 15 A.....	143
Figura 88 Fuente de voltaje 110 VAC a 5 VDC - 1A	144
Figura 89 Circuito de protección de corriente foldback.....	144
Figura 90 Curva de limitación de corriente foldback	145
Figura 91 Página oficial de Processing.org.....	148
Figura 92 GUI Builder de Processing 2.2.1	149

Figura 93 Ensamble del engranaje para el giro de los brazos que transportan las camisetas	150
Figura 94 Unión brazos giratorios – eje de engranaje mediante pernos....	150
Figura 95 Ensamble final de los brazos giratorios de la máquina.....	151
Figura 96 Ensamble de los complementos del brazo de impresión	152
Figura 97 Ensamble del brazo de impresión a la máquina	152
Figura 98 Ubicación del sensor IR GP2Y0A21YK0F	153
Figura 99 Acople encoder incremental – piñón.....	154
Figura 100 Diseño PCB circuito de amplificación modo corte – saturación	154
Figura 101 Diseño PCB del circuito de protección contra sobrecarga.....	155
Figura 102 Elaboración de las placas PCB del circuito acondicionador y del circuito protector de contra sobre corrientes	155
Figura 103 Esquema de conexiones instrumentos de medición con la tarjeta Arduino Mega 2560.....	156
Figura 104 Esquema de conexiones del motor paso a paso y la tarjeta TB6560	157
Figura 105 Esquema de conexión del motor a pasos responsable del giro de los brazos.	159
Figura 106 Diagrama de flujo de la programación del sistema de control.....	162
Figura 107 Diagrama de flujo del funcionamiento del HMI	163
Figura 108 Clases utilizadas en la ventana de acceso	164
Figura 109 Clases utilizadas en la ventana de mando.....	167
Figura 110 Ventana de mando completa con visualización de video stream de la máquina serigráfica automatizada	178
Figura 111 Valores de chi – cuadrado crítico.....	188
Figura 112 Colocación de la camiseta sobre la base.....	191
Figura 113 Acople de la malla serigráfica	191
Figura 114 Colocación de la tinta para serigrafía.....	192
Figura 115 Posicionamiento del brazo giratorio	192

Figura 116 Posicionamiento del racle a su posición inicial	193
Figura 117 Inundación de tinta sobre el marco por medio del racle.....	193
Figura 118 Retorno de racle después de la inundación de tinta	194
Figura 119 Aumento de presión a 2 bares	194
Figura 120 Impresión automática de ida	195
Figura 121 Retorno del vástago del cilindro neumático	195
Figura 122 Camiseta impresa	196

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Recomendaciones para formato de marcos serigráficos	21
Tabla 2 Recomendación de aplicaciones según el número de hilos.....	28
Tabla 3 Equipos profesionales para tensado de tejidos.....	30
Tabla 4 Modelos de Rasqueta	33
Tabla 5 Perfiles de racle	34
Tabla 6 Diferenciación de clises por el método de su realización.....	38
Tabla 7 Lista de defectos de impresión	49
Tabla 8 Matriz de selección del material del engranaje	66
Tabla 9 Criterios a evaluar para la selección del material del engranaje.....	68
Tabla 10 Criterios evaluados para la selección del material del engranaje.....	68
Tabla 11 Parámetros del piñón	70
Tabla 12 Parámetros del engrane.....	70
Tabla 13 Valores del Factor de Forma J de Lewis	71
Tabla 14 Factores de distribución de carga Km.....	74
Tabla 15 Factores de aplicación Ka.....	74
Tabla 16 Coeficiente Elástico AGMA Cp en unidades de $[\text{psi}]^{0.5}$ ($[\text{MPa}]^{0.5}$) .	78
Tabla 17 Especificaciones técnicas del rodamiento 6308.....	96
Tabla 18 Ciclo de Carga de Husillo de Bolas.....	97
Tabla 19 Catálogo de Husillos precargados PND, norma DIN 69051	98

Tabla 20 Diámetro raiz de ejes roscado de husillos de bola.....	102
Tabla 21 Criterios a evaluar para la selección del tipo de cilindro neumático.	107
Tabla 22 Criterios evaluados para la selección de la válvula neumática ..	107
Tabla 23 Características técnicas del Compresor Shimaha W-2006 A.....	113
Tabla 24 Características del motor 23HS45-4204S.....	115
Tabla 25 Matriz morfológica de la selección de la válvula neumática.....	117
Tabla 26 Criterios a evaluar para la selección del sensor de posición angular.	119
Tabla 27 Criterios evaluados para la selección de la válvula neumática ..	119
Tabla 28 Guía de selección de la técnica de control.....	121
Tabla 29 Características del motor 23HS45-4204S.....	123
Tabla 30 Características técnicas del Arduino MEGA 2560	131
Tabla 31 Criterios a evaluar para la selección del sensor de posición angular.	133
Tabla 32 Criterios evaluados para la selección del sensor de posición angular.	134
Tabla 33 Matriz morfológica de la selección del sensor de posición lineal.....	136
Tabla 34 Criterios a evaluar para la selección del sensor de posición lineal.....	137
Tabla 35 Criterios evaluados para la selección del sensor de posición lineal.....	138
Tabla 36 Potencia consumida por los actuadores	142
Tabla 37 Elementos a 5VDC	143
Tabla 38 Tabla comparativa de softwares para desarrollo de HMI	147
Tabla 39 Formato para protocolo de pruebas mecánicas y electrónicas ...	180
Tabla 40 Datos de posición registradas por el encoder incremental.....	183
Tabla 41 Resultados obtenidos de impresiones sobre camisetas claras...	185
Tabla 42 Relación entre el número de repeticiones y la calidad de la impresión.....	186
Tabla 43 Tabla de valores esperados.....	187

Tabla 44 Costos de Materia Prima.....	197
Tabla 45 Costo de herramientas menores de la máquina	198
Tabla 46 Costo de materiales de la máquina.....	199
Tabla 47 Costo de equipos del prototipo de máquina serigráfica automatizada.....	199
Tabla 48 Costos de Mano de Obra	200
Tabla 49 Costo total del prototipo de máquina serigráfica automatizada...	202

RESUMEN

La serigrafía textil es una técnica de impresión empleada para la reproducción de imágenes sobre material textil, que consiste en transferir una tinta a través de una malla tensada en un marco. El barrido de la tinta se lo realiza mediante racles, el sistema de impresión serigráfica puede ser repetida cientos y hasta miles de veces sin perder resolución por lo cual es fundamental contar con máquinas automatizadas que realicen el trabajo. Hoy en día en el Ecuador no existen empresas que construyan este tipo de máquinas automatizadas y resulta muy costoso comprarlas en el extranjero, por lo que el prototipo construido con la ayuda de la Empresa Ortega de la Barra satisface esta necesidad. El prototipo tiene una estructura de tipo pulpo o carrusel que cuenta con 4 brazos giratorios donde están asentadas las camisetas, que giran mediante el empuje de un eje acoplado a un sistema de engranaje accionado por un motor paso a paso de alto torque, cada brazo sujeta un marco con malla tensada para realizar impresiones con tintas de diferentes colores. Cíclicamente los brazos se alinean con un sistema de impresión, que recorre un racle serigráfico con una goma de 70 durómetros montado sobre un husillo de bolas PND 16 x 5, cuyo eje va acoplado con otro motor paso a paso. Con el fin de imprimir imágenes sobre cualquier tono de camiseta por medio de un cilindro neumático de doble efecto. El operador interactúa con la máquina con la ayuda de ventanas de mando HMI, elaborado en Processing, que envía las instrucciones pertinentes al controlador Arduino Mega 2560 y sincroniza la ejecución de los diferentes actuadores de la máquina.

PALABRAS CLAVE:

- **MÁQUINA SERIGRÁFICA AUTOMATIZADA**
- **SERIGRAFÍA TEXTIL**
- **MECANISMO DE ENGRANAJES**
- **MECANISMO DE HUSILLOS DE BOLAS**
- **SISTEMAS NEUMÁTICOS**
- **CONTROL DE POSICION**

ABSTRACT

The silkscreen printing is a printing technique used for the reproduction of images on fabric, consisting in transferring an ink through a mesh tensioned in a frame. Wiping the ink is performed by squeegees, the screen printing system can be repeated hundreds and even thousands of times without losing resolution which is essential to have automated machines to do the work. Today in Ecuador there are no companies that build this type of automated machines and is very expensive to buy abroad, so the prototype built with the help of the Ortega de la Barra Company satisfies this need. The prototype has a carousel structure type with 4 rotating arms which are seated the sweatshirts, rotating by pushing a shaft coupled to a gear system driven by a stepping high torque engine, each arm attached a frame with tensioned mesh for printing with inks of different colors. Cyclically the arms are lined with a printing system that moves a silkscreen squeegee with a rubber of 70 durometers, mounted on a ball screw PND 16 x 5, whose axis is coupled with another stepper motor. In order to print images on any tone shirt using a pneumatic double-acting cylinder. The operator interacts with the machine with the help of HMI control windows, made in Processing, which sends appropriate instructions to Arduino Mega 2560 controller and synchronizes the execution of the various actuators of the machine.

KEY WORDS:

- **SILK SCREEN PRINTING MACHINE**
- **POSITION CONTROL**
- **GEAR MECHANISM**
- **BALLSCREWS MECHANISM**
- **PNEUMATIC SYSTEM**

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

Ortega de La Barra es una empresa textil ubicada en la ciudad de Ambato con el fin de manufacturar y diseñar prendas de vestir para consumidores de todas las edades, por lo que su línea de producción con maquinaria es un eje fundamental para su buena operación.

En Ortega de la Barra se opera con varias máquinas en su mayoría de funcionamiento puramente mecánico, por lo que se encuentran desactualizados del momento tecnológico actual. Para el caso del proceso de estampado de imágenes sobre camisetas, el mismo debe ser realizado por dos o más operarios por no contar con una máquina serigráfica automatizada, lo que reduce la eficiencia de la empresa para producir grandes volúmenes de prendas estampadas, ver figura 1.



Figura 1 Maquina Serigráfica Manual Textil Tipo Pulpo de la Empresa Ortega de la Barra

Esta máquina requiere obligatoriamente la presencia de más de un operador, aquellos que se colocan en cada brazo que sujeta una camiseta e imprimen sobre esta las imágenes en tinta manualmente. En este tipo de máquinas uno de los mayores inconvenientes es la falta de sincronización y coordinación que se experimentan en los operarios, ya que al ser un humano

este no opera como máquina perfecta, por lo que sucede es que mientras uno de ellos al finalizar la impresión espera un intervalo de tiempo considerable a que otro o todos los demás operarios acaben de imprimir para poder proceder con la siguiente impresión de camiseta y la siguiente consecutivamente. Debido a dicha pausa repetitiva, es que se aprecia un significativo desperdicio de recurso humano y tiempos de producción.

El presente proyecto pretende utilizar la tecnología necesaria para implementar un sistema de impresión serigráfica muy bien sincronizada y operada por una sola persona. Este sistema se basa en los principios de automatización y control como de diseño mecánico industrial, el cual permite que desde un servidor o software principal se encomiende a los diferentes controladores en realizar sincrónicamente la ejecución de los actuadores responsables de la impresión de imágenes sobre camisetas de cualquier color con bastos ciclos de trabajos.

En el mercado de venta de camisetas estampadas, la demanda y la maquinaria disponible son los factores determinantes para considerar la elaboración de una máquina para serigrafía automatizada, ya que, si aumenta la demanda se buscará producir más impresiones, utilizando una máquina que ocasione menores costos y disminución del impacto ambiental, considerando además que se podrían cubrir las expectativas de la empresa y del capital disponible para hacer frente a una mayor rentabilidad gracias a la reducción de tiempos en fabricación con óptima calidad.

Realizando un estudio exhaustivo de varias fuentes bibliográficas y recursos de búsqueda por internet, no se encontraron máquinas serigráficas tipo pulpo automatizadas totalmente hechas y fabricadas en el Ecuador, por lo cual la implementación de este sistema en la empresa Ortega de la Barra, daría una ventaja económica a los gerentes al contar con un prototipo mucho más barato que los que se pueden importar del exterior con similar utilidad.

El único proyecto a fin que existe actualmente realizado en el Ecuador es el de “Diseño y construcción de una impresora de serigrafía neumática para superficies planas de funcionamiento automático” realizado en una tesis de grado por dos estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, sin embargo se encuentra totalmente desactualizado con las posibilidades tecnológicas actuales en cuanto se refiere a utilidad y procesos de impresión en serie.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A lo largo de la historia de la industria textil se han construido varios dispositivos que han sido útiles para realizar impresiones de imágenes sobre telas y debido a la gran demanda que el cliente exige a las empresas, se ha ido innovando con el transcurso del tiempo máquinas que permitan imprimir más camisetas en menor tiempo.

Sin embargo, en la actualidad en muchas empresas textiles del Ecuador estas máquinas siguen siendo totalmente mecánicas. Mientras que en otras partes del mundo ya se venden máquinas serigráficas netamente automatizadas con componentes electrónicos sofisticados, el precio de las mismas es excesivo así como la dificultad de importarlas por su extenso tamaño, ver figura 2.



Figura 2 Maquina Serigráfica Textil Automatizada Sportsman E

Fuente: (M&RCompanies, 2013)

Evidentemente la necesidad de innovar máquinas semejantes en el Ecuador es de gran beneficio para minimizar los gastos de cuenta corriente en importación.

El presente trabajo pretende fabricar un prototipo a menor escala pero útil y semejante a los pulpos automatizados del exterior en funcionalidad y control. Cuyos parámetros de operatividad son características propias de un producto totalmente mecatrónico. El diseño mecánico y electrónico del proyecto es totalmente independiente de otros trabajos ya que se rige a las necesidades que exige la empresa Ortega de la Barra.

Este producto tendrá varias mejoras sobre la máquina que se muestra en la figura 1, que actualmente posee la empresa Ortega de la Barra. La primera mejora es que es totalmente autónomo, ya que necesita de una sola persona para operarlo. Por lo que se aprovecha al máximo los recursos humanos, tiempo y materiales con el funcionamiento continuo e interrumpido de la máquina construida.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El proceso de impresión serigráfica realizado por un operario humano, presenta bastantes limitaciones cuando se trata de estampar imágenes en gran número, siendo uno de las principales inconvenientes el excesivo tiempo empleado en el cargado e impresión.

El operario al contar con una máquina serigráfica automatizada tiene la oportunidad de familiarizarse con la alta tecnología del presente, al sustituir el proceso artesanal por uno más técnico y efectivo, que a su vez le permita optimizar su trabajo, mejorar su servicio, elevar su rentabilidad y en consecuencia mejorar su calidad de vida.

Otro motivo más en que las empresas textiles requieren de la automatización es que en la mayoría de las máquinas netamente mecánicas no se las puede explotar potencialmente al máximo su operación como se muestra en la figura 1, donde por motivos económicos no se logran colocar en todos los brazos de la estación operadores encargados de la impresión. Esto produce que se desperdicie el capital invertido en la máquina, situación que difiere de las máquinas automatizadas donde su aprovechamiento es al máximo posible.

El presente proyecto tiene la finalidad de entregar a la empresa Ortega de la Barra un mecanismo que se ajusta a las posibilidades tecnológicas actuales y que permite a los ejecutivos controlar de mejor manera su producción. El gerente podrá solicitar a la Interfaz Maquina Humano un registro histórico de camisetas impresas cuando lo desee. Esta herramienta es importante hoy en día en empresas en crecimiento y que desean implementar softwares como MES o ERP donde los registros de producción de las máquinas son de suma importancia para las soluciones administrativas que estos softwares proporcionan.

La importancia de utilizar un software de libre acceso para el desarrollo del proyecto como lo es Processing, es para evitar el excesivo gasto que se

invierte al comprar las licencias de softwares de no libre acceso como Labview, Matlab, entre otros, que a pesar de la complicada en programación y realización de interfaces GUI sobre estos softwares libres, el ahorro bordea los cientos de dólares lo que es significativo para este tipo de proyectos.

Los principios de funcionamiento de la máquina entregada, pueden ser optimizados en un futuro al intercomunicarse con otras máquinas textiles como enrolladoras, termo-selladoras, plegadoras automatizadas que operen sincrónicamente por medio del software Processing implementado, el cual permite la conexión tipo cliente-servidor entre controladores, donde la pirámide de automatización se aplicaría en su gran mayoría dentro de la empresa, aumentando la rentabilidad del negocio y mejorando el prestigio de Ortega de la Barra.

1.4. ALCANCE

1.4.1. COMPONENTES MECÁNICOS

Los componentes mecánicos que conforman el presente proyecto, se los menciona en la figura 3.

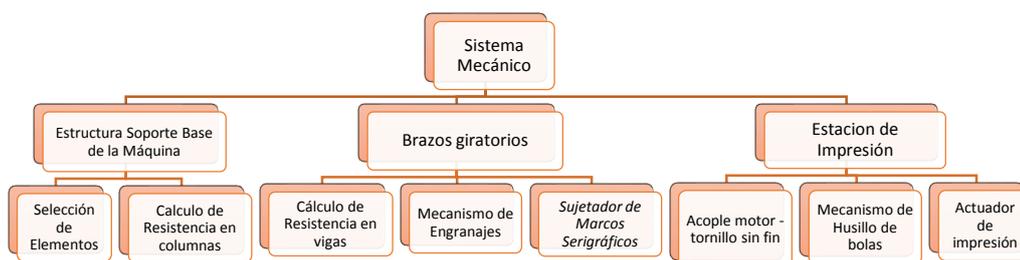


Figura 3 Componentes mecánicos de la Máquina Serigráfica Textil Automatizada tipo Pulpo

- *Estructura Soporte Base de la Máquina:* la base donde se construirá la estación de máquina serigráfica de cuatro brazos rotatorios será sobre una estructura de soporte de vigas plenamente diseñadas con ingeniería, basándose en:
 - Selección de elementos mecánicos necesarios para la implementación del soporte.
 - Cálculo de Resistencia en columnas para el soporte base de todas las partes mecánicas de la máquina.
- *Brazos rotatorios:*
 - *Cálculo de Resistencias:* Se requiere diseñar las dimensiones necesarias de los brazos rotatorios para seleccionar su material con un factor de seguridad adecuado y evitar el exceso de peso como la flexión y corte de los mismos.
 - *Sujetador de Marcos Serigráficos:* Este sujetador será incorporado a los brazos rotatorios y tienen la funcionalidad de portar los marcos Serigráficos tensados, estos sujetadores serán colocados milimétricamente para el éxito de la impresión.
 - *Mecanismo de Engranajes:* Este mecanismo será el utilizado para transmitir la potencia requerida desde el motor de alto torque hacia el eje de los brazos para hacerlos rotar.
- *Estación de Impresión:*
 - *Acople Motor – Tornillo sin fin:* Se requiere realizar un acople correcto, que permita que en el tornillo se genere el torque necesario para avanzar o retroceder el husillo de bolas.
 - *Mecanismo de tornillo de bolas:* Este mecanismo es el encargado de movilizar linealmente el actuador de impresión, montado sobre un husillo de bolas, a lo largo de la camiseta.
 - *Actuador de Impresión:* El diseño del actuador de impresión debe ser el adecuado para la aplicación, el cual debe portar el cilindro neumático y el holder del racle, encargados de efectuar la presión necesaria para imprimir las imágenes sobre las camisetas.

1.4.2. COMPONENTES ELECTRONICOS/ELECTRICOS

Los componentes electrónicos que constituyen el presente proyecto, se los muestra en la figura 4.

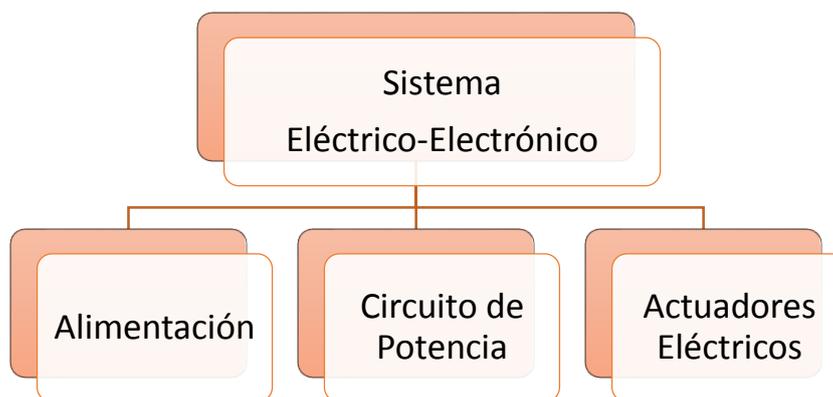


Figura 4 Componentes electrónicos de la Máquina Serigráfica Textil Automatizada tipo Pulpo

- *Alimentación:* Selección e implementación de una fuente de alimentación con protección, que será utilizada para proveer 24 V DC para el accionamiento de los motores a gran potencia, y suministrar 110 V AC al solenoide de la electroválvula que acciona el cilindro neumático de doble efecto.
- *Circuito de Potencia:* Selección y adquisición de un driver para motor de alto amperaje, con conexión al controlador.
- *Actuadores Eléctricos:* Los actuadores eléctricos son los motores que ejercen los movimientos de traslación y rotación a los componentes del sistema, como una válvula de accionamiento por solenoide que controla el movimiento del cilindro neumático de doble efecto.

1.4.3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL

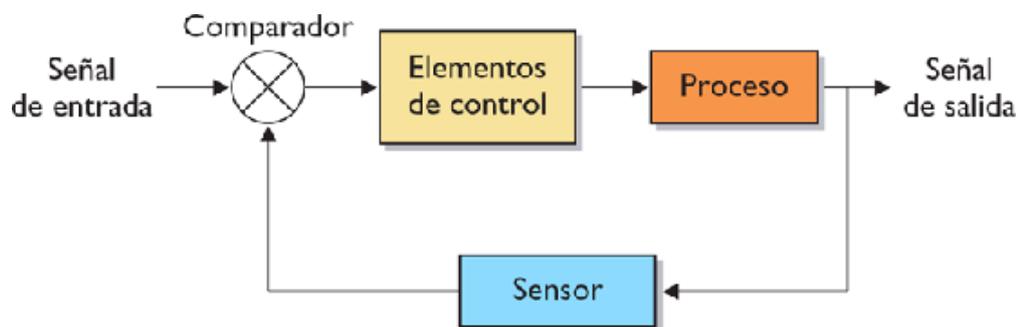


Figura 5 Sistema de Control en lazo cerrado

Fuente: (Guinea-Edeso, 2012)

Al saber los parámetros que serán controlados en el sistema de máquina serigráfica automatizada tipo pulpo, que son el desplazamiento angular de los brazos de la estación y el desplazamiento lineal del husillo de bolas, se los controlará de acuerdo a los requerimientos del sistema, los cuales deberán tener una relación equilibrada entre el MP, Ts y Ess, que son componentes esenciales de un sistema de control en lazo cerrado ver figura 5.

Los componentes del sistema de control que constituyen el presente proyecto, se los menciona en la figura 6.

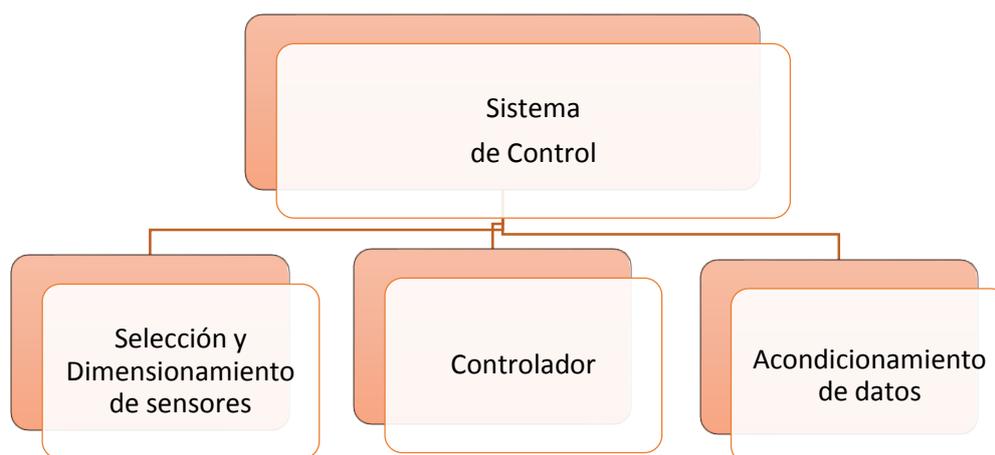


Figura 6 Componentes del sistema de control de la Máquina Serigráfica Textil Automatizada tipo Pulpo

- *Selección y Dimensionamiento de sensores:* Se seleccionarán los sensores capaces de medir el posicionamiento de la rotación de los

brazos de la estación como del desplazamiento del husillo de bolas, los cuales pueden ser entre un encoder absoluto o incremental para el primer posicionamiento como sensores ópticos, infrarrojos o de ultrasonido para el segundo.

- *Controladores:* Selección y adquisición de más de un controlador tipo arduino Mega 2560 conectados al bus serial de ordenador, el cual trabajará como controlador servidor o principal.
- *Acondicionamiento de señales:* El acondicionamiento de señales para de la salida de los sensores de distancia a utilizar será por medio de filtrado para eliminar el ruido, amplificado y protegido por resistencias para evitar sobrecorrientes con la conexión con los puertos del arduino que funcionará como tarjeta de adquisición de datos.

1.4.4. SOFTWARE PARA IMPLEMENTACIÓN, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN

Los programas que se usarán durante el desarrollo de la tesis se detallan a continuación:

- Software SOLIDWORKS para diseño CAD/CAE, el cual permitirá el diseño de los elementos mecánicos y ensamble completo de la máquina serigráfica textil automatizada tipo pulpo, así como la simulación de estudios estáticos de las estructuras de soporte para determinar los factores de seguridad que eviten fallas. Y simulación del movimiento completo de la máquina para anular cualquier interferencia de sólidos en el diseño.
- Processing (JAVA), software libre para el establecimiento de una interfaz HMI de control principal y adquisición de datos. Así como para la programación de los controladores Arduino Mega 2560 conectados al bus serial del ordenador.
- Matlab versión estudiantil para el análisis mecánico de la máquina y gráficas del sistema.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de una estación de máquina serigráfica textil automatizada para la empresa Ortega de La Barra.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar, dimensionar y seleccionar todos los componentes mecánicos, electrónicos y de instrumentación que conformarán el prototipo de estación de máquina serigráfica textil automatizada tipo pulpo con cuatro brazos giratorios, de tal forma que tenga buena resistencia y un desempeño óptimo.
- Configurar el control de los tres principales actuadores que constituyen el prototipo con el fin de que trabajen en coordinación y realicen las impresiones de imágenes sobre las camisetas continuamente sin perder la sincronización.
- Comprobar que mediante un buen diseño mecatrónico se puede generar un prototipo de estación de máquina serigráfica textil automatizada versátil con la capacidad de cumplir las funciones de cualquier máquina serigráfica textil común con un valor agregado de autonomía y control de producción.
- Utilizar elementos tecnológicos de vanguardia en la elaboración del prototipo de estación de máquina serigráfica textil automatizada, de tal forma los operarios de la empresa Ortega de la Barra se familiaricen y utilicen con facilidad los mismos para la optimización de la producción.
- Realizar una interfaz agradable al usuario la cual permita visualizar todos los datos procesados que definen el comportamiento del prototipo de estación de maquina serigráfica textil automatizada.
- Elaborar los manuales de operación que permitirán un correcto manejo por los operarios del prototipo de estación de máquina serigráfica textil automatizada para la producción.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. SERIGRAFÍA

La serigrafía es un proceso empleado para la reproducción de imágenes coloridas sobre casi cualquier material, y que consiste en transferir tinta con la ayuda de un racle, a través de una pantalla tensada de un tejido selecto para la aplicación. El bloqueo de las áreas donde no habrá imagen se lo realiza mediante recubrimiento de barniz o emulsión fotosensible, (conocido como clisé), dejando libre la zona por donde pasará la tinta, ver figura 7.

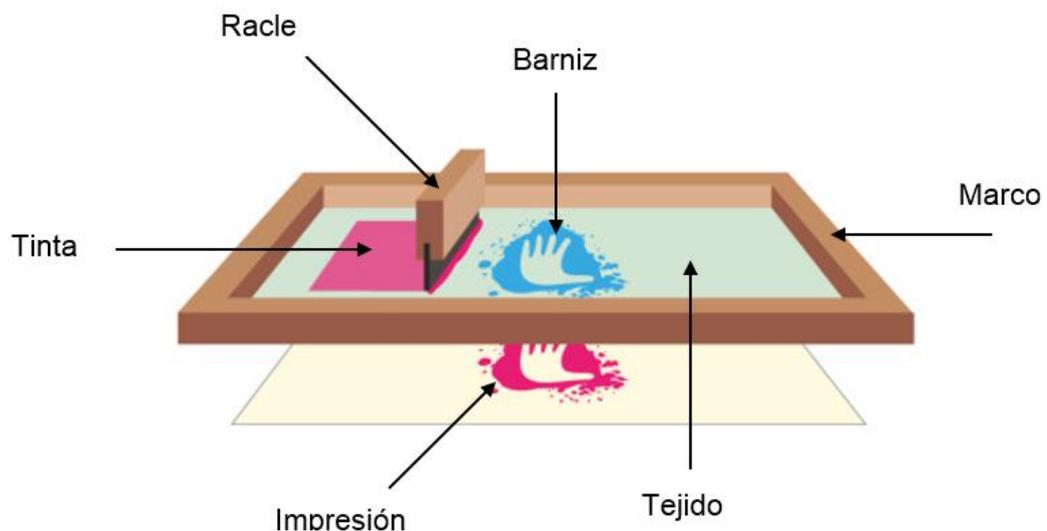


Figura 7 Proceso Básico de Impresión Serigráfica

Fuente: Propia

La zona de impresión de la imagen está abierta para el paso de tinta, es decir son permeables a la misma, mientras que la zona donde no se imprime la imagen está obturada y son impermeables a la tinta.

La serigrafía es uno de los cuatro procesos existentes para impresión de imágenes sobre materiales, ver figura 8.

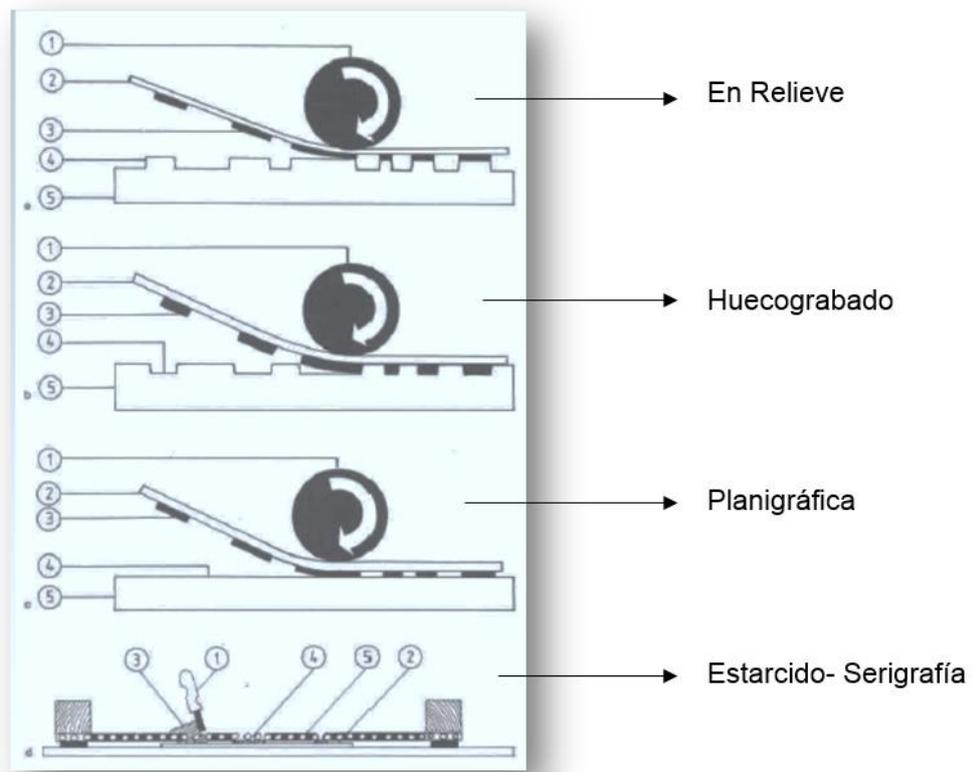


Figura 8 Cuatro procedimientos de impresión

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

Donde es la serigrafía la cual presta las mejores facultades para la impresión de imágenes sobre materiales textiles, así como para la manufacturación de maquinaria sencilla para su aplicación. Ya que la fabricación de maquinaria para realizar los otros procesos de impresión son más complejos y a su vez más caros, sin siquiera mejorar la calidad de la impresión, motivo el cual carecen de aplicación dentro de la industria textil.

2.1.1 USOS COMERCIALES DE LA SERIGRAFÍA

En el mundo comercial la serigrafía resulta ser muy versátil y se la usa en una gran variedad de superficies que incluyen textiles, metal, madera, vidrio, Persex, plásticos, cartón, etc. Las letras instantáneas usadas en los estudios de diseño y las calcomanías en seco con las que juegan los niños sólo están disponibles gracias a la tecnología de la tinta para serigrafía.

Los circuitos impresos, esenciales para las computadoras y aparatos domésticos, se serigrafían aprovechando la exactitud y precisión de las mallas de acero inoxidable.

La serigrafía no solo funciona en superficies lisas. Las paredes, por ejemplo, pueden decorarse con imágenes que se imprimen directamente sobre ellas. Se imprimen directamente botellas y latas en prensas cilíndricas, los plásticos con frecuencia se forman al vacío después de haber sido impresos con tinta flexible, y los globos decorados se inflan con imágenes impresas en ellos con tinta expandible.

El uso de la serigrafía es fundamental para la industria textil ya sea para producir telas exclusivas impresas a mano o materiales para cadenas de tiendas, camisetas o logos de diseñador, (ver figura 9). Algunos de los usos más extraños del medio se pueden encontrar en la industria de los alimentos, donde pasteles y dulces son a veces decorados con temple de huevo y tintes comestibles.



Figura 9 Impresión serigráfica sobre camiseta

Fuente: (Faine, 1991)

2.1.2. NUEVOS DESARROLLOS

Los nuevos desarrollos incluyen tintas electrónicas sensibles al tacto, tintas desprendibles para competencias y tintas de raspar y oler para anuncios de revistas o películas sensoriales.

Pero ha sido la llegada de las tintas curadas al ultravioleta la que más ha hecho para abrir nuevas áreas de actividad. Estas tintas permanecen húmedas hasta que se les expone a la luz ultravioleta, y entonces secan con una gran rapidez. Este desarrollo ha significado que hay producción de libros de alta calidad, que antes sólo eran apropiadas para la impresión litográfica, que están siendo serigrafiadas, combinando la calidad del color con una velocidad de impresión comparable a la de una imprenta litográfica automática.

El futuro de la serigrafía es sólo tan limitado como la visión de aquellos que la usan, y siempre habrá quienes hallen nuevos usos para ella. A diferencia de los otros medios establecidos para la impresión fina, como el “etching”, el “engraving” y la litografía, la serigrafía aún está en el proceso de forjarse una tradición.

2.1.3. LIMITACIONES DE LA SERIGRAFIA

El desarrollo de tintas fluidas y mallas finas significa que hay muy pocas imágenes que no se pueden imprimir. Las líneas repujadas no se pueden imprimir con pantallas pues el proceso requiere de una presión que sólo se obtiene por impresión directa, como aguafuerte o grabado. Sin embargo, sí se pueden producir líneas levantadas en la superficie usando la tinta apropiada y se pueden repujar formas después de la impresión.

La impresión de un tono continuo, independientemente del medio, exige que sea dividido en pequeñas partículas e impreso como puntos finos, ya sean regulares, en el caso del medio tono, o irregulares, para una mezzotinta.

La serigrafía puede imprimir un fino patrón de puntos, pero la litografía, el aguafuerte y la calcografía pueden producir imágenes más finas.

Dentro de estas limitaciones se puede imprimir prácticamente cualquier cosa. La dificultad radica en determinar cómo hacer el clisé y decidir qué tipo de malla debe usarse.

2.1.4. ELEMENTOS Y MATERIALES

La selección correcta de los elementos y materiales que intervienen en un proceso de impresión serigráfica marca una gran diferencia a la hora de estampar imágenes sólidas y duraderas sobre la prenda.

2.1.4.1. EL MARCO

El marco serigráfico es el apoyo sobre el cual se tensa una tela o tejido que conjuntamente forman una pantalla. Las funciones y requisitos que debe proporcionar son los siguientes:

- Contar con un clisé enérgicamente tensado sobre el marco.
- Suministrar estabilidad.
- Proporcionar resistencia a la deformación para no producir alabeo.
- Tener gran resistencia a los cambios de temperatura, humedad, químicos, disolventes y detergentes.
- Ser liviano.
- Construirse de material con propiedades resistentes al desgaste y corrosión para ser reutilizado y tener larga vida útil.

En su versión más simple un marco puede hacerse de un rectángulo de cartón grueso del cual se corta y retira un rectángulo más pequeño del centro, cubierto de un lado por una burda tela de organdí pegada al cartón. Esto sería perfectamente adecuado para imprimir imágenes pequeñas de hasta 15 x 20 cm.

- **MARCO DE MADERA**

El marco de madera es el más barato de todos, puede ser fabricado propiamente por un artesano por lo cual se lo encuentra muy utilizado en industrias medianas. Es ligero y práctico para manejarlo, y el más adecuado para trabajos sencillos. Es el tipo más confiable de marco, y el elegido por la mayoría de principiantes en la industria.

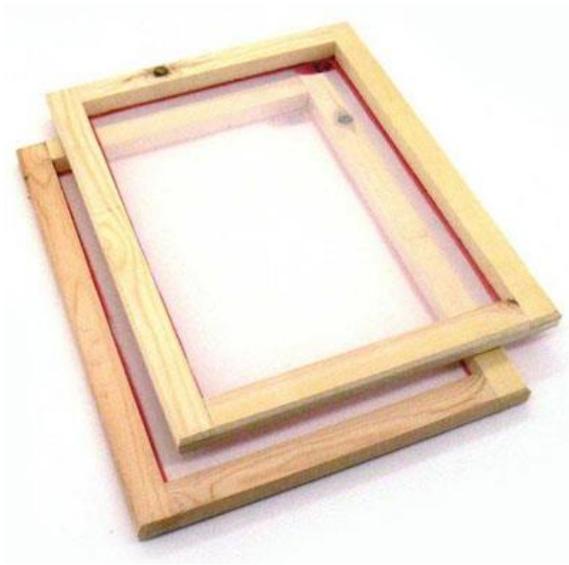


Figura 10 Marco de Madera para Serigrafía

Fuente: (Libertaria, 2012)

El artesano que fabricará el marco requiere de ciertas habilidades básicas de juntas. Una ventaja de fabricar un marco de este material es que uno puede elegir el tamaño que requiera. Además estos marcos también pueden ser hechos en casa por uno mismo tomando en cuenta ciertas consideraciones.

La madera debe tener grano recto y no estar torcida; el fabricante comercial usa cedro porque es resistente al agua, rígido y ligero. Se debe asegurar que el peso de la madera sea apropiado para el tamaño de la pantalla, pues cuando la tela se fija ejerce una considerable tensión. Sin

embargo, el marco no debe ser demasiado pesado, pues debe poder ser manejado con facilidad.

Las esquinas del marco de madera contienen casi todo el esfuerzo de la tensión y deben estar adecuadamente pegadas y embonadas, es decir no simplemente atornilladas o clavadas. En la figura 11, se ilustra los cuatro tipos de juntas fuertes más utilizadas.

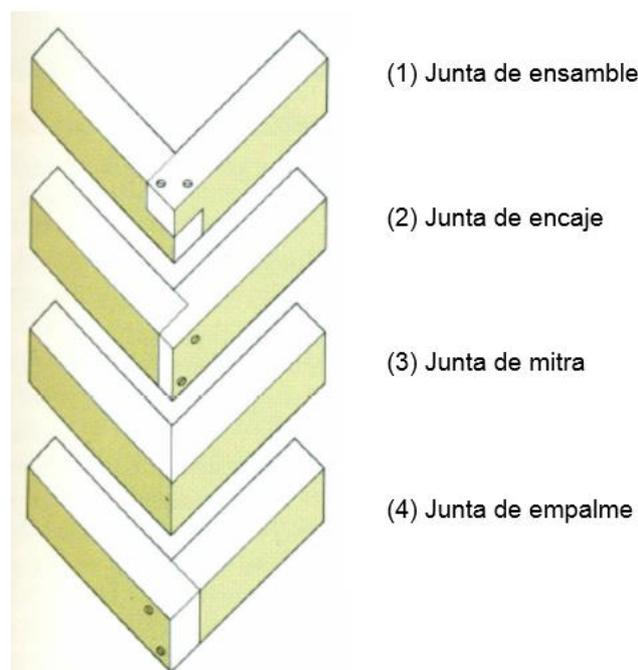


Figura 11 Tipo de Junta Fuerte en Marco

Fuente: (Faine, 1991)

Finalmente, todos los marcos de madera deben cubrirse de un acabado protector repelente al agua y a la tinta, como un barniz de poliuretano o shellac mezclado con un destilado de metilato o laca transparente.

- **MARCO METÁLICO**

La mayoría de los impresores profesionales usan marcos metálicos, puesto que son más duraderos y, si se tensan correctamente, hacen más sencillo registrar las impresiones pues no se retuercen o comban bajo la

tensión de la tela. Los marcos de madera, incluso si son prefabricados profesionalmente, a la larga se doblarán y deformarán, haciendo que se distorsionen los raíles o también conocidos como estenciles.

Los marcos de metal se los pueden hacer de aluminio, que se maneja fácilmente por su ligereza pero que puede distorsionarse si se le coloca incorrectamente en la mesa de impresión, o de acero, que si está recubierto con un preservador horneado es el material más fuerte y durable, ver figura 12.



Figura 12 Marco de Acero para Serigrafía

Fuente: (Hernandez, 2015)

Preferiblemente se lo compra ya hecho y tensado con el tejido adecuado acorde a su uso final. Hay dos perfiles básicos de la sección transversal del marco que se pueden seleccionar: la caja, que es rectangular, y el serimarco, ver figura 13.

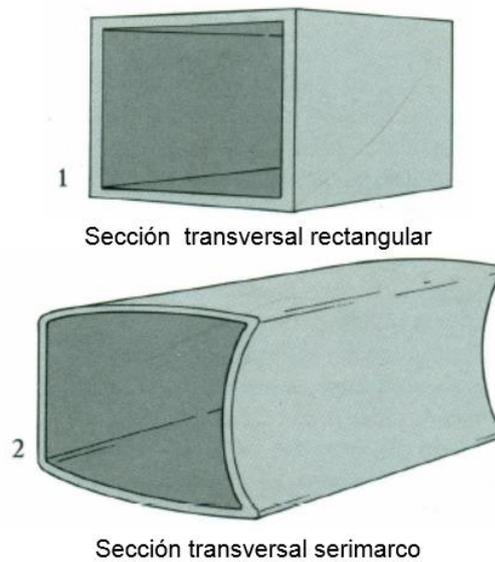


Figura 13 Secciones Transversales de marcos metálicos

Fuente: (Faine, 1991)

Si para imprimir se usa una mesa casera, un marco de sección de caja es mejor porque se coloca más fácilmente. Mientras que si se usa una mesa de impresión profesional, se escoge al serimarco que es más fuerte, más resistente a la tensión de la tela y más fácil de limpiar debido a su perfil interior.

- **ELECCIÓN DEL MARCO POR TAMAÑO**

Para la selección del marco se parte por el conocimiento de la medida correspondiente a la imagen que se va a imprimir, cuyo marco debe contar con medidas interiores de 8 a 30 cm mayores a dicha medida. Si la medida interior es muy ajustada se produce una presión no uniforme del racle y una presión distinta en la superficie del soporte lo que dañaría la impresión.

Además se debe dimensionar la reserva de tinta que es la superficie de tejido no usada entre el tema a imprimir y el borde interior del marco, ver figura 14.

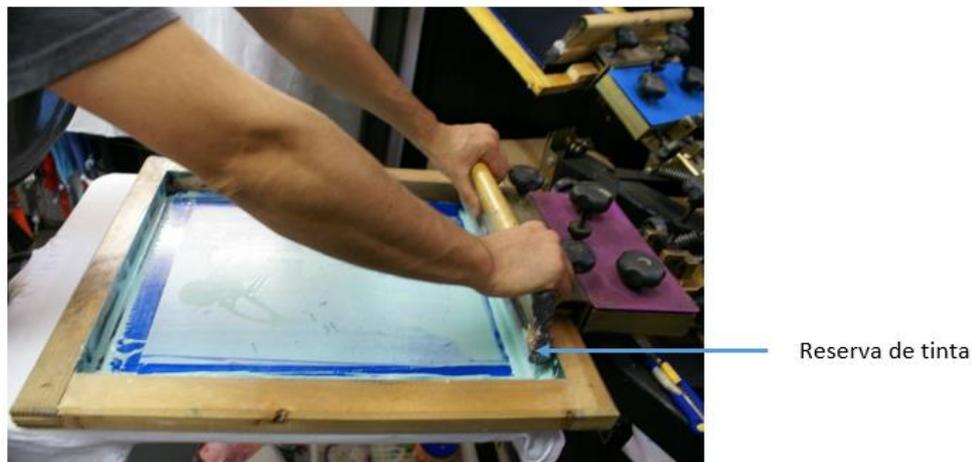


Figura 14 Reserva de Tinta dentro de un Marco Serigráfico

Fuente: (Domínguez, 2013)

- **FORMATO DE MARCOS**

Tabla 1

Recomendaciones para formato de marcos serigráficos

Formato DIN	Tamaño de impresión (cm)	Reserva de tinta long (cm)	Interior del Marco (cm)	Exterior del marco (cm)
A4	21 x 30	2 x 8/12	37 x 54	43 x 60
A3	30 x 42	2 x 10/12	50 x 66	56 x 72
A2	42 x 59	2 x 10/14	62 x 87	70 x 95
A1	59 x 84	2 x 14/16	87 x 116	95 x 124
A0	84 x 118	2 x 16/18	116 x 154	126 x 164 128 x 166
----	118 x 420	2 x 15/30	148 x 480	168 x 500

Fuente: (Faine, 1991)

Es importante tomar en cuenta las medidas recomendadas para la selección o fabricación de un marco serigráfico, puesto que estas se han ido

ajustando mucho más a los requerimientos de la industria textil desde hace ya muchas décadas.

De todos los formatos de marcos serigráficos mencionados, permanecen constantes los rangos que determinan la superficie aprovechable de los mismos, ver figura 15.

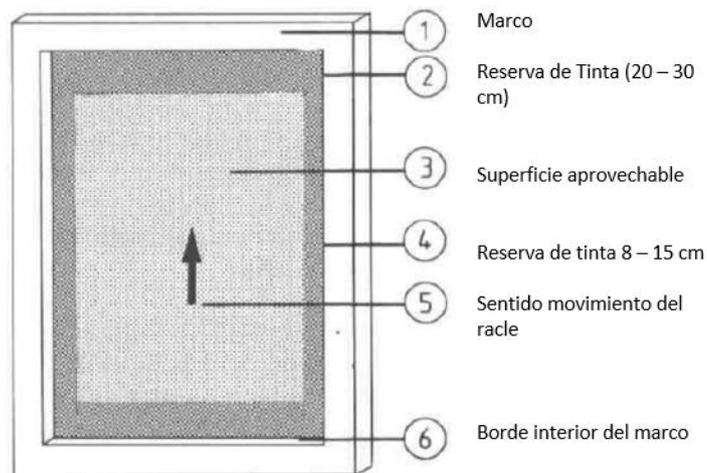


Figura 15 Superficie aprovechable del formato de marco

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

2.1.4.2. EL TEJIDO

El tejido en una pantalla serigráfica es un material con estructura de tamiz que se tensa en el marco y que sirve de sustentación al clisé. Una amplia gama de materiales pueden estirarse sobre un marco para hacer la pantalla. Su selección depende del trabajo que uno quiere hacer y de cuanto se pueda invertir.

Los tipos de telas que se utilizan para emplear esta función son:

- Fibras naturales: organdí, seda.
- Fibras sintéticas: nylon, poliéster, perlón.
- Hilos metálicos: bronce, acero inoxidable.

- **ESTRUCTURA DEL HILO DEL TEJIDO**

Existen dos estructuras del hilo los cuales son: Tejidos multifilares, de varias hebras o multifilamento y los tejidos monofilares, de una sola hebra o monofilamento, (ver figura 16), se puede apreciar de mejor manera la diferencia en la abertura de malla de ambos tejidos. En la izquierda se observa la estructura de un multifilamento y en la derecha de un monofilamento del mismo número: 77 hilos, aumentando unas 31 veces.

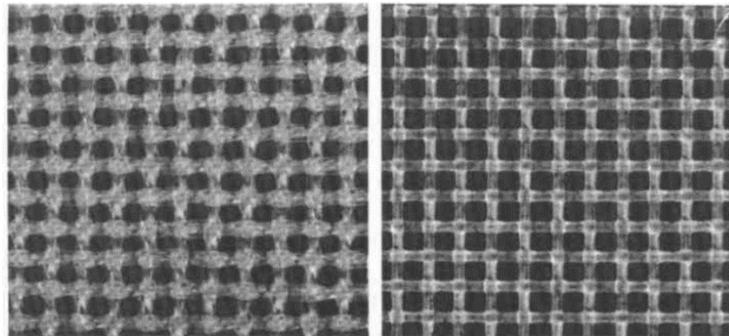


Figura 16 Comparación de la abertura de malla en tejidos

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

El tejido multifilamento se compone de varias fibras individuales trenzadas, dichas fibras se desgastan por frotamiento con el racle. Los hilos de varias hebras son más gruesos que los monofilamento, sus aberturas de las mallas son menores y la permeabilidad a la tinta es menor.

La lineatura del tejido es el número de hilos del tejido por cm, (ver figura 17). Para serigrafía las lineaturas varían entre 15 hasta 200 hilos por centímetro, los más seleccionados son de entre 80 y 150. Cuanto más alto es el número de hilos por centímetro, más finos son los hilos. En la izquierda vemos los tejidos de 15 hilos por cm y a la derecha los de 200 hilos por cm.

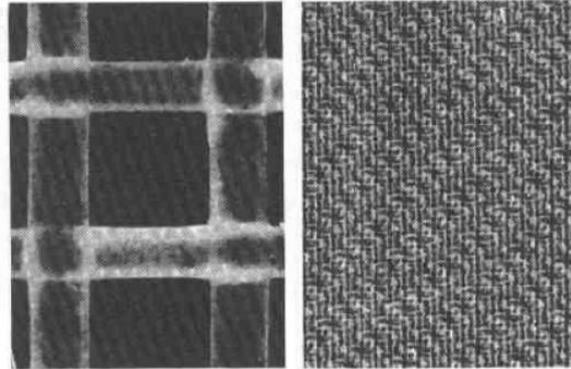


Figura 17 Gama de posibles lineaturas de tejido

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

El tejido de 80 hilos por cm es el recomendado para aplicaciones de impresión serigráfica en carteles de trazo grueso, sobre placa de fibra dura y rugosa, planos, láminas de grano grueso para aplicación de lacas de relleno, fondos de superficies y sobre todo en soportes textiles, es decir remeras.

- **TRAMA DEL TEJIDO**

El tejido que se elija debe ser lo más fuerte posible para evitar que se rasgue cuando se estire, debe ser dimensionalmente estable y que no la afecte la humedad o el agua. El material debe ser inerte e impermeable a las sustancias que estarán en contacto con él. Mientras mayor sea la fuerza tensil del tejido, registrará de modo más consistente, pues se resistirá a la distorsión cuando se pase el racle o rasero sobre ella.

La trama o peso del tejido se describe mediante las letras T o HD, que remplazan al antiguo sistema de letras donde S = fino, M = medio, T = pesado y HD = trabajo extra pesado. T se refiere ahora al trabajo normal, el más útil para las bellas artes y la impresión a mano, mientras HD o trabajo pesado está diseñado predominantemente para grandes corridas a máquina, ver figura 18.

- a) 62 hilos por cm S
- b) 62 hilos por cm T
- c) 62 hilos por cm HD

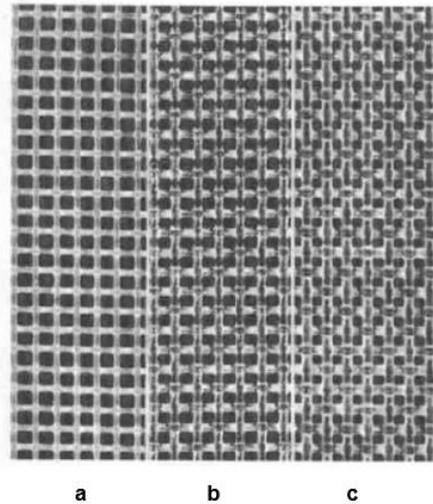


Figura 18 Distintos tramas de tejido con el mismo número de hilos

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

Una trama HD con el mismo conteo que una trama T requiere mayor presión del rasero durante la impresión y deposita una película de tinta más fina debido a las menores aperturas de trama.

- **CONTEO DE TRAMA Y DEPÓSITO DE TINTA**

El conteo de trama limita el área abierta de la trama, lo que a su vez determina la calidad del depósito de tinta. Una trama fina con un alto conteo, digamos 150 T, permite que sólo se imprima una delgada película de tinta, en tanto que una basta, digamos 42T, permite una película gruesa.

Cuando se planea una impresión, es importante decidir qué tan pesadamente entintada se desea que quede la impresión y qué conteo de trama es el apropiado para el trabajo.

La mayoría de los estudios profesionales usan una gama de alrededor de seis conteos diferentes que van de 42T a 180T, pero pueden llegar a necesitar una trama tan basta como 20T para imprimir tintas brillantes. El impresor escolar o el artista que empieza a imprimir ediciones hallará que los

conteos de 62T y 90T son suficientes: el 62T para áreas generales y el 90T para el trabajo fino.

Es una buena práctica escribir indeleblemente en cualquier nuevo marco cuál es el conteo de trama del tejido. Si éste se olvida, el conteo puede verificarse usando un cuentahilos o una muestra de lino para ayudar a contar los hilos.

TIPOS DE TEJIDOS

Existen seis tipos diferentes de tejido o tela adecuados para hacer pantallas, que varían en sus características, costo y, en algunas ocasiones, en su adecuación para distintos usos.

- **Organdí**

Es una tela de algodón, generalmente con un conteo de trama de 70 a 90 hilos por pulgada. Ya que es la opción menos costosa y fácil de tensor, es ideal para el principiante.

El organdí puede adquirirse en tiendas de textiles. Es adecuado para usarse con marcos de cartón para producir impresiones pequeñas como tarjetas de navidad. Las limitaciones de esta combinación son la baja fuerza tensil de la tela y el hecho de que se expande al humedecerse y se contrae al secarse la hace difícil de registrar.

- **Seda**

Solía ser la tela originalmente usada para la serigrafía. Es más fuerte que el organdí. La seda se debe humedecer al estirla para obtener una pantalla verdaderamente tensa. En la mayoría de las situaciones, la seda es inferior a los materiales sintéticos, excepto por el método de goma y tusche para hacer estenciles. La seda nunca debería usarse con fotoestenciles, pues el blanqueador que se utiliza en el proceso ataca la trama.

- **Telas de monofilamento de nylon**

Se producen con hilos o filamentos más finos que los de la seda y son más fuertes y más elásticos que los arriba mencionados. La elasticidad es una ventaja cuando se imprime en superficies irregulares, como cerámica, telas o incluso ladrillos, pero es una desventaja en el registro preciso "borde con borde" o de tope.

Para la tensión adecuada del nylon se requiere un proceso de dos etapas: primero debe tensarse al nivel adecuado y luego se le permite dar de sí durante 15 minutos. Luego debe medecerse el centro antes de completar finalmente la tensión y fijar la tela al marco.

- **Poliéster de monofilamento**

Es el mejor material a usarse para imprimir ediciones limitadas, por la necesidad de un registro preciso. Es la más fuerte, más estable dimensionalmente y químicamente inerte de todas las tramas no metálicas. Como el nylon, requiere de una tensión a máquina de dos etapas a una tensión mayor de la que aceptan la mayoría de las telas y aceptará todos los materiales para hacer estenciles si se le prepara apropiadamente.

El poliéster de multifilamento se utiliza mucho en la industria textil y en la impresión de grandes carteles para carteleras cuando se usan fotoestenciles directos.

- **Poliéster con chapa de níquel y con chapa de acero inoxidable**

Son las telas más estables dimensionalmente que producen un registro más consistentemente exacto. Se les usa principalmente para circuitos impresos y trabajos de similar nivel de precisión. Sin embargo, tienen desventajas para el impresor artístico por cuanto son costosas y se arrugan si se les maneja mal, inutilizándolas para la aplicación de estenciles.

La rigidez de estos materiales evita la distorsión local deliberada con cinta adhesiva para corregir irregularidades de registro. Las tramas metálicas deben ser tensadas profesionalmente puesto que son costosas y esto es preferible al riesgo de rasgarlas cuando una persona aplica la tensión.

Tabla 2

Recomendación de aplicaciones según el número de hilos

NUMERO DE HILOS POR CM	APLICACIÓN RECOMENDADA
80 HILOS	<ul style="list-style-type: none"> • Carteles de trazo grueso • Impresión sobre placa de fibra dura y rugosa • Planos • Láminas de grano grueso para aplicación de lacas de relleno • Fondos de superficies • Impresión en soportes textiles (camisetas)
100 HILOS	<ul style="list-style-type: none"> • Tramas monocolor • Carteles normales • Rótulos grandes • Láminas de grano fino • Impresiones transparentes • Embalajes • Placas

CONTINÚA 

120 HILOS

-
- Tramas gruesas multicolor
- Líneas finas directas e indirectas
- Láminas lisas
- Circuitos integrados
- Rotulaciones medias

140 HILOS

- Tramas finas multicolor
- Líneas muy finas
- Superficies delicadas
- Etiquetas
- Escalas de medida
- Cuadrantes – mapas

- **TENSADO DEL TEJIDO**

Después de obtener el marco y seleccionar el tejido es fijar ésta al marco, procedimiento conocido como tensar el marco. Para un marco de madera, el tejido puede tensarse a mano, pero se obtiene un resultado más profesional usando un tensor mecánico de barras rodantes, una costosa pieza de equipo.

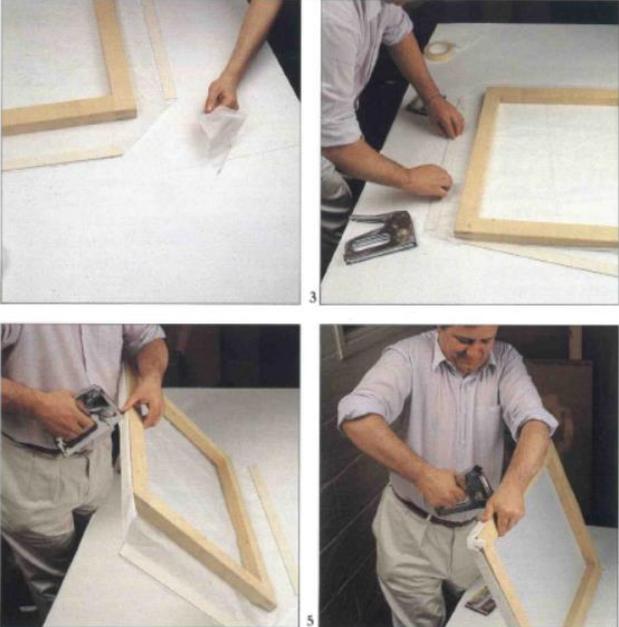
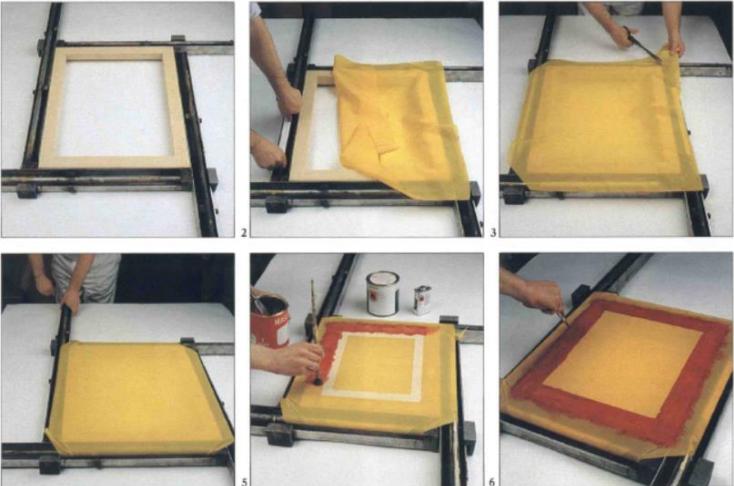
Puede ser preferible llevar las pantallas a que sean tensadas profesionalmente pues las ventajas de hacer esto pueden pesar más que el incremento en costo. Si la pantalla se tensa profesionalmente, uno puede confiar en que la tela estará adecuadamente tensada, apropiadamente fijada al marco y también correctamente posicionada, con los hilos paralelos a las orillas del marco, manteniendo un patrón de trama de ángulos rectos.

Otra ventaja de emplear a un tensor profesional es que el cliente paga sólo por el área de tela utilizada, pues las pantallas habitualmente se tensan en grandes cantidades con poco desperdicio. En caso de que la tela se

rasgue debido a una tensión excesiva, el costo de reemplazo es absorbido por la compañía, no por el cliente.

Tabla 3

Equipos profesionales para tensado de tejidos

EQUIPO TENSOR	ILUSTRACIÓN
<p>Tensado Manual</p>	 <p>Figura 19 Tensado manual de pantalla para serigrafía</p>
<p>Tensor Barra Rodante</p>	 <p>Figura 20 Tensor de barra rodante para pantallas serigráficas</p>

CONTINÚA 

**Tensor
Mecánico**

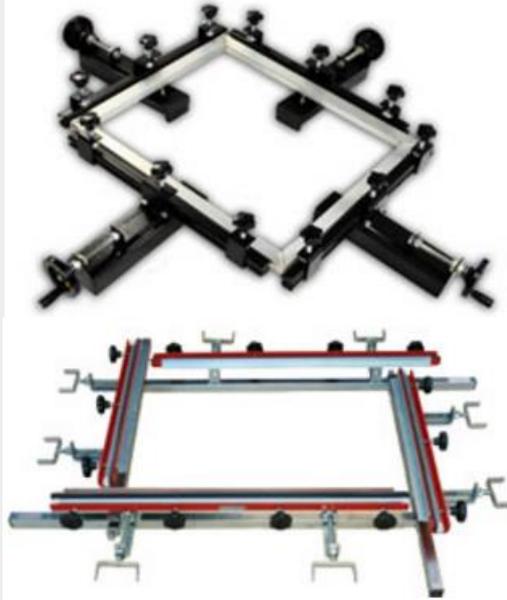


Figura 21 Tensores mecánicos de pantallas serigráficas
Fuente: (Seidentech, 2012)

**Tensor
Neumático**

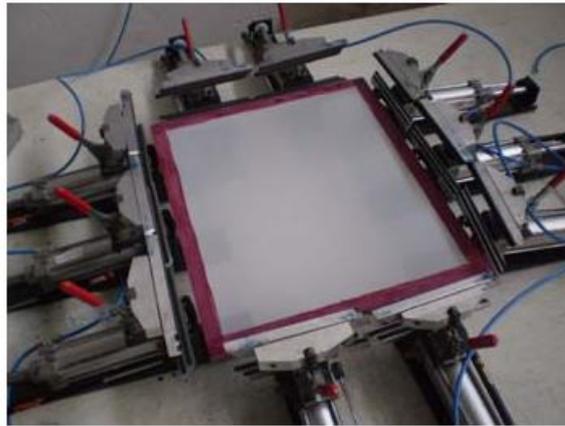


Figura 22 Tensor neumático de pantallas serigráficas

CONTINÚA →

**Tensado
Marco
Maestro**



Figura 23 Tensado de marco maestro de serigrafía

Fuente: (Faine, 1991)

Normalmente en la actualidad el vendedor del marco nos provee el mismo con la tela tensada, permitiendo escoger el tipo de tejido a tensar y el equipo con el que va a ser tensado, lo cual nos ahorra un trabajo importante.

Los defectos de un bajo tensado son los siguientes:

- Líneas y límites de superficies poco precisos y deformados.
- El tejido queda adherido al soporte luego de la impresión.
- Dificultades de localización (registro) en impresiones polícromas.
- Desgaste prematuro del clisé o racle.

2.1.4.3. EL RACLE

La función del racle es de distribuir la tinta uniformemente sobre la cara interior del marco encima del tejido. De modo que rellena los lugares abiertos del clisé con tinta.

Tabla 4

Modelos de Rasqueta

MODELO	ILUSTRACIÓN
De prisionero de metal con hoja recambiable	 <p data-bbox="906 674 1286 712">Figura 24 Racle de metal</p>
De madera con hoja recambiable	 <p data-bbox="807 1012 1385 1050">Figura 25 Racle con hoja recambiable</p>
De madera con hoja fija	 <p data-bbox="879 1337 1313 1375">Figura 26 Racle con hoja fija</p>
Rasqueta para tres colores	 <p data-bbox="842 1899 1350 1937">Figura 27 Racle para tres colores</p>

Fuente: (Domínguez, 2013)

Aplicación de acuerdo a la dureza de la hoja o goma

- Hoja Blanda: 55 – 65 Shore
 - Superficies grandes
 - Desigualdades superficiales en el soporte
 - Soportes duros como vidrio, metal, plástico
- Hoja Dura 75 – 85 Shore
 - Adecuada en impresiones de grandes formatos
 - Líneas finas, impresiones tramadas
 - Soportes blandos como fieltro, cartón
 - Tintas más densas

• PERFILES DE RACLE

Los perfiles de racle para distintas aplicaciones son cinco, ver tabla 5.

Tabla 5

Perfiles de racle

PERFIL	APLICACIÓN	ILUSTRACIÓN
a. Filo rectangular	<ul style="list-style-type: none"> • Para detalles y líneas finas • Impresión tramada • Impresión de contornos nítidos sobre papel y cartón 	 <p>Figura 28 Racle de filo rectangular</p>

CONTINÚA →

b. Filo rectangular y cantos romos

- Para capa de tinta gruesa y opaca
- Impresión sobre fondos oscuros
- Tintas luminosas a la luz del día
- La impresión no es de contornos tan nítidos como en el afilado recto



Figura 29 Racle de filo rectangular y cantos romos

c. Filo redondeado

- Para mucha carga de tinta
- Impresión de productos Textiles
- Impresión en materiales absorbentes



Figura 30 Racle de filo redondeado

d. Filo en bisel

- Impresión sobre materiales no absorbentes
- Impresión sobre materiales duros, vidrio, metal, cerámica y plástico



Figura 31 Racle de filo en bisel

**e. Filo en
doble bisel**

- Impresión semiautomática o automática sobre formas redondeadas o cónicas (impresión de objetos tridimensionales)



**Figura 32 Racle
de filo en doble
bisel**

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

2.1.4.4. TINTAS Y MEDIOS AUXILIARES

Una particularidad esencial de la serigrafía en cuanto a la técnica de impresión es que, puede imprimirse sobre casi todos los materiales, cualquiera sea su forma, estructura y naturaleza superficial.

Es por eso la necesidad de usar tintas especiales, que contienen más pigmentos, y por ende mayor tiempo de secado.

- **Tintas de secado físico**

Los disolventes se evaporan a temperatura ambiente normal, el proceso se acelera con la exposición al aire y calor. Se secan entre 10 y 50 minutos para el apilado.

Con el empleo de máquinas de secado, el mismo puede hacerse en segundos, el tiempo de secado de estas tintas es más corto que en las tintas que se secan por oxidación.

- **Tintas de oxidación**

Son tintas que se secan al tomar el oxígeno del aire, el tiempo de secado puede durar varias horas. Los grupos diferentes de tintas de impresión

brillante con aglutinantes sobre bases de aceites secos, pertenecen a este grupo. Una vez seca la capa de pintura es bastante resistente a los disolventes.

- **Tintas de secado químico**

Son tintas que se secan al aire o al calor a causa de una reacción química de dos componentes (tinta y endurecedor) que forman un compuesto químico. La película de tinta endurecida es muy resistente en general y resistente a los agentes atmosféricos.

- **Tintas de base acuosa**

Son para uso textil fundamentalmente, además son diluibles con agua y facilitan la limpieza notablemente.

- **Sustancias auxiliares para tintas**

- Diluyentes: se utilizan para manejar la consistencia de la tinta, es decir la viscosidad.
- Retardadores: retrasan el proceso de secado de las tintas durante el proceso de impresión para evitar que se seque en el tejido de la pantalla.
- Detergentes: sirven para limpiar la imagen a imprimir (el clisé) y los instrumentos de trabajo.
- Pastas de impresión
- Barniz de impresión.
- Limpia mallas.
- Agentes extensores.
- Sustancias secantes

2.1.4.5. EL CLISADO

- **TIPOS DE CLISÉ**

Tabla 6
Diferenciación de clises por el método de su realización

Clisado Manual		Clisado Fotomecánico		
Clisés de recorte	Clisés dibujados	Clisés de reporte directo	Clisés de reporte indirecto	Clisés de reporte directo - indirecto
Las formas a imprimir se recortan a mano de un material adecuado, es decir, se realizan con independencia de la pantalla y, a continuación se transfiere al tejido.	Los clisés se realizan dibujando o pintando directamente sobre la pantalla, mientras que partes del tejido se obturan con cola, goma laca, tinta china, emulsión, etcétera.	Se trata de capas de resorte sensibles a la luz, películas fotográficas y papeles de pigmento. Las partes de foto emulsión afectadas por la luz se endurecen, las partes no expuestas se pueden desprender mediante el revelado.		
Pertencen a este grupo: <ul style="list-style-type: none"> ○ Clisés sencillos de papel ○ Películas recortables ○ Papeles o láminas autoadhesivos para clisé 	Pertencen a este grupo: <ul style="list-style-type: none"> ○ Clisés de obturación ○ Clisés de lavado ○ Clisés de emulsión 	La capa de reporte líquida se extiende sobre el tejido y se insola después de secar.	El clisé se transfiere al tejido después de la insolación y el revelado como papel de pigmento o como película fotográfica de contacto	El clisé consta de una emulsión y de una película fotográfica de contacto y se insola y revela después de la transferencia
	Ventajas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Realización fácil y barata ○ Trabajo rápido y directo sobre la pantalla 	Ventajas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Se pueden transferir temas fotográficos. ○ Es posible obtener impresiones tramadas monocolor y policromas. ○ Son reproducibles todos los temas gráficos y pictóricos ○ Alta estabilidad en la tirada y contra la abrasión ○ Fácil de realizar 	Ventajas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Como en clisado directo ○ Mayor nitidez en los bordes que con el método directo ○ Adecuado también para los trabajos más finos 	Ventajas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Trata de combinar las ventajas de los otros dos métodos ○ Su gran capacidad de resistencia permite altas tiradas ○ Máxima nitidez de contornos en detalles finos y copias tramadas

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

- **FUNCIÓN Y REQUISITOS**

El clisé tiene por misión transmitir la imagen al soporte que es sustentado por el tejido tensado en el marco. A través de las partes abiertas del clisé, la tinta se transmite al material que recibe la impresión.

Todos los puntos del clisé que no han de imprimirse deben ser impermeables a la tinta.

Las tintas que contienen disolventes exigen clisés resistentes a los mismos, mientras que las tintas acuosas exigen clisés resistentes al agua.

- **CLISÉS FOTOMECÁNICOS**

Permiten la reproducción con detalles muy finos, se utilizan emulsiones sensibles a la luz, sobre las cuales el tema a imprimir debe copiarse a través de un modelo o imagen a copiar por medio de la exposición llamada también insolación.

Luego de la insolación la capa de reporte experimenta una reacción química por el efecto de la luz y se endurece, cambiando su estado de soluble a insoluble.

Si la capa fotosensible se recubre durante la insolación con una transparencia a la que se copió el modelo por medio de una fotocopidora, esta zona no se endurece y pueden lavarse con agua tras la insolación para crear las zonas abiertas del clisé.

- **PASOS PARA LA PREPARACION DEL CLISÉ**

1. *Preparación de la pantalla:*

- a. Limpiar la pantalla de restos de tinta y de clisé.
- b. Desengrasarla por medio de lavado por una solución acuosa con detergente.

- c. Dejarla secar bien, no tocar con las manos para evitar pasar grasitud a la tela soporte.
2. *Transferir la imagen al soporte transparente:*
 - a. Fotocopiar la imagen en una transparencia siempre en color negro.
 - b. Revisar bien que no le queden poros o zonas donde pueda pasar la luz.
 - c. Si queda algún poro, taparlo con acrílico negro y esperar que seque bien.
3. *Sensibilizar la emulsión:*
 - a. Hacer todo con luz naranja en cuarto oscuro.
 - b. Mezclar la solución fotosensible con el dicromato en la proporción adecuada.
 - c. Mezclar bien con una varilla de madera.
 - d. Dejar reposar bien, 30 minutos, para que se vayan burbujas de aire en lugar oscuro.
4. *Recubrir la pantalla con emulsión:*
 - a. Hacer todo con luz naranja en cuarto oscuro.
 - b. Distribuir una capa con la rasqueta acanalada por el lado de la impresión.
 - c. Distribuir una o dos capas con la rasqueta acanalada por el lado de la rasqueta.
 - d. Dejar secar en posición horizontal.
 - e. Ayudar el secado con un ventilador.
5. *Secado de la pantalla:*
 - a. Secar la pantalla en posición horizontal.
 - b. La cara de impresión va para abajo.
 - c. En cámara oscura o con luz naranja amortiguada.
 - d. Temperatura entre 20 y 40 °C.
 - e. En ausencia de polvo.

- f. Secado al aire, soplador de aire caliente o armario de secado.
- g. Cuando seca en todo su espesor alcanza la máxima sensibilidad.

6. *Insolación de la pantalla:*

- a. Mediante la insolación se transfiere la imagen a copiar a la capa fotosensible.
- b. Se utiliza un reflector con fuente luminosa de alto contenido de componentes actínicos ultravioleta y azules.
- c. Son lámparas de halogenuro metálico, de arco de carbón, HPR.

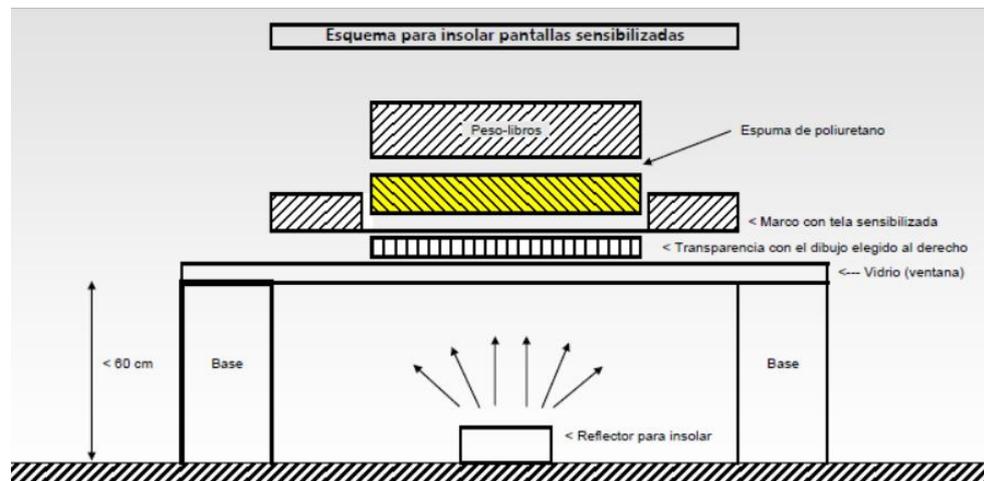


Figura 33 Esquema para insolar pantallas sensibilizadas

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

7. *Revelado del clisé:*

- a. Poner la pantalla en la instalación de lavado.
- b. Enjuagar bien el clisé con agua fría, con un chorro de agua a presión de manera de ir abriendo las zonas donde pasa la tinta.
- c. Se culmina cuando el dibujo se reconoce con claridad y el agua discurre sin espuma.

8. *Comprobación de lugares defectuosos:*

- a. Retocar los lugares porosos, los pequeños daños o alfilerazos con sellador de pantalla o laca correctora de pantalla.

- b. Para un mejor control visual poner la pantalla a contraluz contra una fuente luminosa.
- c. Realizar la obturación de los márgenes con sellados de pantalla y cubrir el borde interior del marco con cinta de enmascarar.

2.1.5 PROCESO DE IMPRESIÓN SERIGRÁFICA TEXTIL

Cuando se trata de lograr un buen resultado de impresión, es primordial prestar una especial atención a los factores que más influyen en la impresión serigráfica textil. Estos factores de influencia decisivos son el tipo de pantalla, la tinta, el racle y su recorrido.

El recorrido del racle es una variable influenciada por parte del impresor a través de las variables de velocidad de la máquina y longitud del recorrido, ver figura 34.

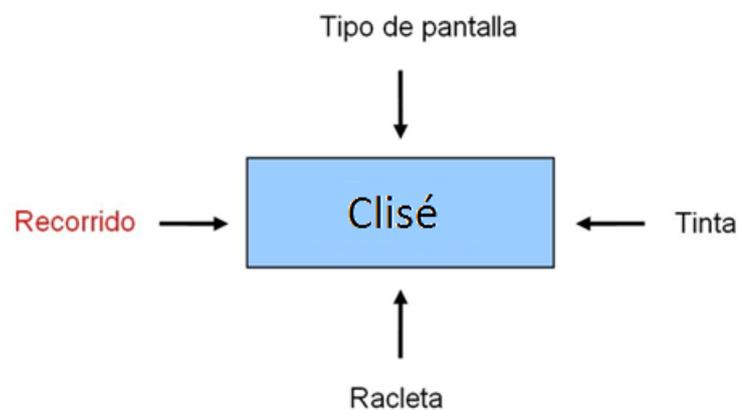


Figura 34 Esquema de las variables influyentes en la impresión serigráfica

Fuente: (Propia)

2.1.5.1. OPERACIONES PREVIAS PARA IMPRESIÓN

Antes de efectuar la impresión se debe prever ciertos factores importantes, que son:

- Cada color del tema a imprimir necesita un clisé propio.

- Cada color necesita un proceso de impresión propio por cada ejemplar a imprimir de la tirada total.
- Se debe ajustar muy bien la pantalla en la mesa de imprenta.
- Se debe seleccionar el racle adecuado.
- Se debe tener a disposición de los medios auxiliares y del soporte.
- La elección de la mezcla de tinta debe ser la adecuada.

- **AJUSTE DE PANTALLA EN MESA DE IMPRENTA**

Obligatoriamente se deben seguir las instrucciones a continuación para ajustar la pantalla serigráfica en la mesa de imprenta:

- Fijar la pantalla en el porta-marco de la mesa imprenta.
- Marcar la posición del clisé sobre el soporte.
- Ajustar el marco mediante los tornillos de ajuste fino hasta que el soporte coincida exactamente con el clisé.

Colocación de topes

Se deben crear puntos fijos con ayuda de topes de marginación para el soporte de la pantalla, ver figura 35.

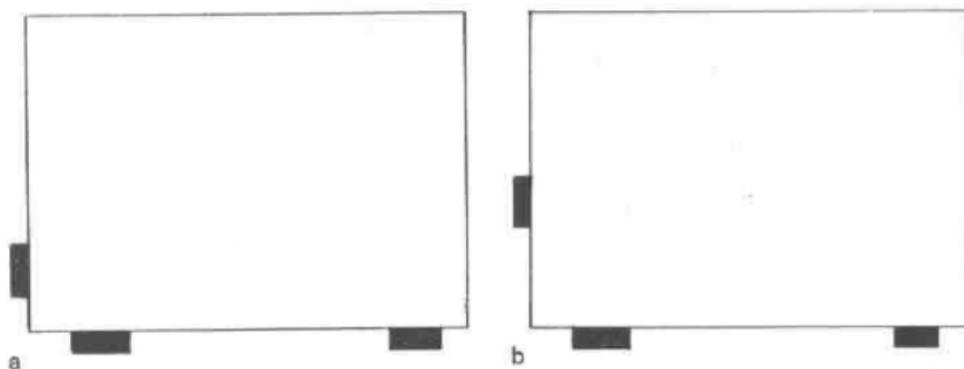


Figura 35 Colocación de topes de marginación a) correcto, b) incorrecto

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

En su mayoría son toques plástico duro autoadhesivo, también pueden ser trozos de cartón o de papel 2 cm ancho por 3 cm longitud aproximadamente. Se usa la disposición de tres puntos en casi todas las colocaciones de toques.

Fijación del fuera de contacto

La función de fijar el fuera de contacto es de regular la altura del marco, a fin de garantizar que el tejido se desprenda del soporte una vez que pasa la rasqueta o racle.

El fuera de contacto es la separación entre la cara inferior del marco o cara de impresión y el soporte, el escalón varía entre 2 y 8 mm, ver figura 36.



Figura 36 Fuera de contacto

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

El escalón debe mantenerse lo más bajo posible por motivos de exactitud de localización, en la tirada el fuera de contacto no debe modificarse nunca. En caso de serigrafía textil el escalón es igual a 0 cm, ya que se apoya el clisé directamente sobre la tela a imprimir.

Elección de la rasqueta adecuada

La rasqueta debe ser adecuada a la naturaleza de cada tinta, al soporte, al tipo de clisé y sobre todo deben sobresalir algunos centímetros, 3 cm aprox, por ambos lados del tema a imprimir, ver figura 37.

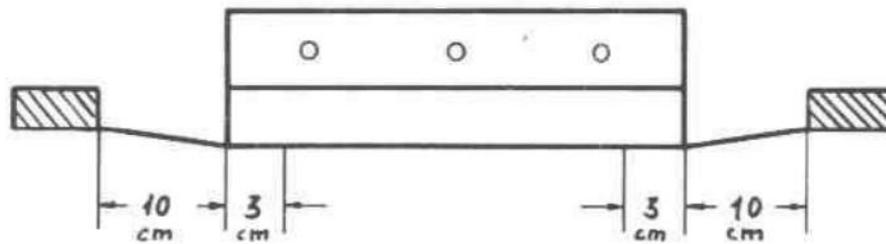


Figura 37 Separación de la rasqueta con respecto a la pantalla.

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

- **ORDEN DE OPERACIONES PREVIAS A LA IMPRESIÓN**

1. Control del clisé (fuentes de error).
2. Sellado borde interior del marco con cinta de enmascarar para evitar fugas de tinta.
3. Comprobar limpieza de la mesa de imprenta.
4. Fijar marco al dispositivo de impresión.
5. Ajuste de la pantalla sobre la mesa de imprenta.
6. Colocación de topes.
7. En mesa sin máquina de vacío, aplicar un pegamento adhesivo en la mesa de imprenta.
8. Ajuste del fuera de contacto.
9. Disposición de medios auxiliares.
10. Disposición del soporte junto a la mesa de imprenta.
11. Elección y mezcla de la tinta adecuada.

2.1.5.2. EJECUCIÓN DEL PROCESO DE IMPRESIÓN

Una vez realizadas las operaciones previas al proceso de impresión se procede con los siguientes pasos:

- 1) *Inundación*: Se extiende la tinta, antes del proceso de impresión y sin ejercer presión sobre toda la pantalla, la tinta debe cubrir con un espesor uniforme en los lugares abiertos del clisé, el ángulo de ataque suele no ser muy importante, ver figura 38.

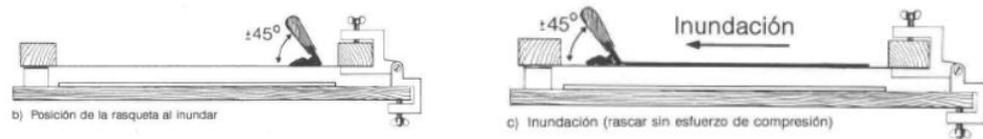


Figura 38 Inundación

Fuente: (Faine, 1991)

- 2) *Impresión*: Se coloca el racle detrás de la tinta, se atrae hacia sí sobre la pantalla con un esfuerzo de compresión uniforme, el ángulo de ataque es de 75° o más, ver figura 39.

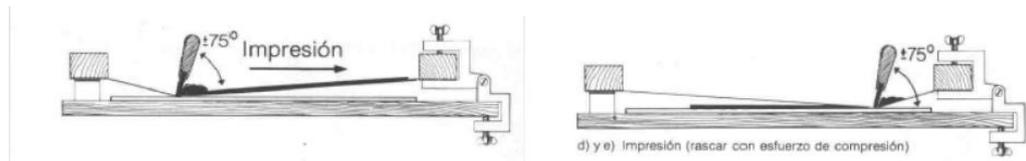


Figura 39 Impresión

Fuente: (Faine, 1991)

2.1.5.3. NIVELACIÓN DE TINTA

Una nivelación óptima de la tinta es decisiva en la impresión serigráfica, ya que la serigrafía sigue es el método de impresión donde se alcanzan los máximos espesores de capa de tinta.

Mientras más tinta se encuentre en el soporte de impresión, más importante es que la nivelación de la tinta se ajuste de forma óptima a la imagen impresa deseada.

Caso contrario, las posibles disonancias podrían ser detectadas visualmente por el consumidor final y degradar la calidad del producto.



Figura 40 Visualización de tintas de impresión niveladas

Fuente: (Gallus Group, 2013)

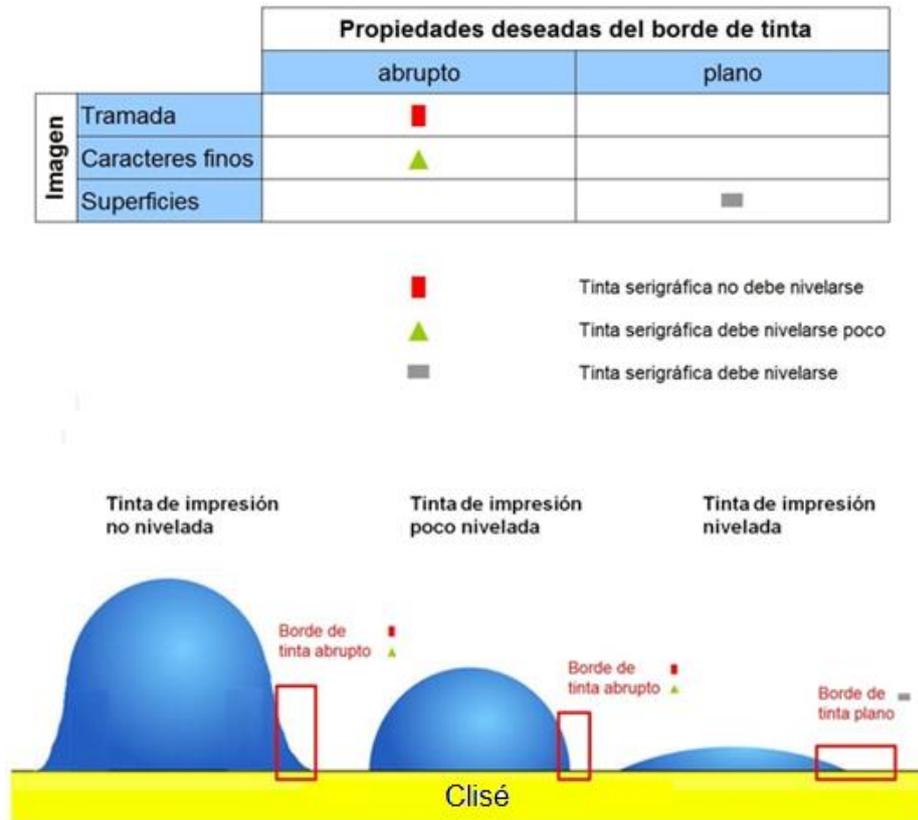


Figura 41 Propiedades deseadas del borde de tinta

Fuente: (Gallus Group, 2013)

• **VELOCIDAD DE LA MÁQUINA Y RECORRIDO**

La velocidad de la máquina y la longitud del recorrido del racle son dos parámetros que están directamente relacionados entre sí y que afectan al mismo tiempo el comportamiento de nivelación de la tinta serigráfica.

– **Velocidad de máquina variable y recorrido de racle constante**

Cuando se trabaja con altas velocidades de máquina, la tinta de impresión apenas tiene tiempo de nivelarse, y por el secado se genera un borde de tinta. Mientras que a baja velocidad de máquina, la tinta dispone de tiempo suficiente para nivelarse y el borde de tinta queda plano cuando se seca. Esta propiedad física es la diferencia principal de la serigrafía cara a otros métodos de impresión, que permiten velocidades máximas de impresión, ver figura 42.

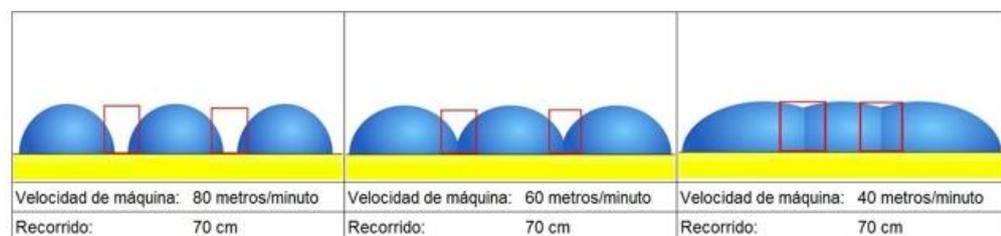


Figura 42 Nivelación de tinta según velocidad de maquina variable y recorrido de banda constante

Fuente: (Gallus Group, 2013)

– **Velocidad de máquina constante y recorrido de racle variable**

Con un recorrido de racle corto, la tinta apenas tiene tiempo de nivelarse, por el secado que se genera en el borde de tinta. Sin embargo, con un recorrido de banda largo, la tinta tiene tiempo suficiente para nivelarse y el borde de tinta es plano durante el secado, ver figura 43.

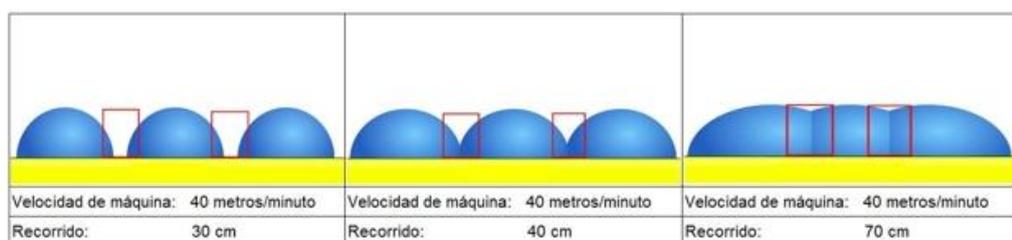


Figura 43 Nivelación de tinta según velocidad de máquina constante y recorrido de banda variable

Fuente: (Gallus Group, 2013)

2.1.5.4. DEFECTOS DE IMPRESIÓN

Los defectos de impresión son muchas veces producidos ya sea por la irregularidad del espesor de la tinta, o el excesivo del mismo, entre otros que se citaran a continuación.

Tabla 7

Lista de defectos de impresión

Defecto	Motivo
Espesor excesivo de tinta	<ul style="list-style-type: none"> • Angulo de ataque de la rasqueta demasiado plano • Hoja de rasqueta gastada
Puntos finos	<ul style="list-style-type: none"> • Fallo en el clisé • Soporte con polvo
Efecto diente de sierra	<ul style="list-style-type: none"> • Recubrimiento incorrecto • Tejido demasiado vasto para el clisé fotomecánico • Capa de reporte incorrecta
Desplazamientos en policromía	<ul style="list-style-type: none"> • Los topes están mal colocados
Desplazamientos de impresión	<ul style="list-style-type: none"> • Colocación inexacta del soporte • Tensión del tejido demasiado pequeña • Acumulación de polvo en la superficie por electricidad estática
La tinta se extiende debajo del clisé	<ul style="list-style-type: none"> • El clisé se ha desprendido • Incorrecta consistencia de tinta (muy fluida)
La tinta se seca en el tejido	<ul style="list-style-type: none"> • Incorrecta consistencia de la tinta (muy extensora) • Pausas demasiado largas entre procesos de impresión • Elevada temperatura ambiente
Lugares en blanco en la imagen impresa	<ul style="list-style-type: none"> • Tejido sucio con restos de tinta seca en los lugares abiertos del clisé

Fuente: (Zuccarelli, 2013)

2.1.6. DISPOSITIVOS DE IMPRESION

En la industria textil se cuenta con varios dispositivos que permiten imprimir o estampar gráficos sobre camisetas como se los menciona a continuación.

2.1.6.1. DISPOSITIVOS DE IMPRESIÓN MECÁNICOS

Impresoras de superficie de mesa

Este método implica el uso de abrazaderas de bisagra para mantener la pantalla sobre una superficie de enrutado. Esto es un método primitivo con las desventajas de que carece de la velocidad, facilidad, precisión, y la productividad de una impresora real.

- a. La superficie de impresión debe ser suave y duro.
- b. La tabla debe ser enrutado como se muestra de tal manera que el marco de la pantalla quede plana sobre la mesa.
- c. El perno de la bisagra en las abrazaderas van bajo la zona de ronda de la mesa, se coloca la pantalla en las abrazaderas apretándola.
- d. Utilice pegamento en spray sobre la mesa para sostener el papel a la camiseta en posición y sin arrugas. Se rocía ligeramente, se deja secar durante unos 30 segundos y se posiciona el sustrato.

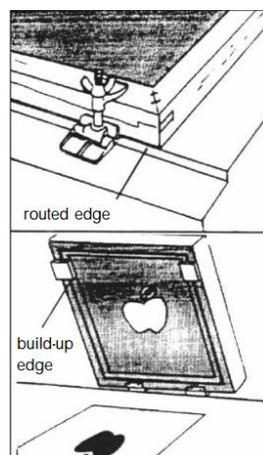


Figura 44 Impresora de superficie de mesa

Fuente: (Tyler, 2014)

Impresora Serigráfica de Mesa de 4 Colores

Ideal para escuelas o tiendas pequeñas con espacio limitado, es eficiente y una alternativa de bajo costo para modelos de impresión de larga producción.

Características:

- 4 colores, 1 estación
- Ajuste de abrazaderas laterales.
- Brazo del rodillo ajustable.
- Rodamientos de fuerza industrial.
- Admite pantallas de 19" a 23" fuera.

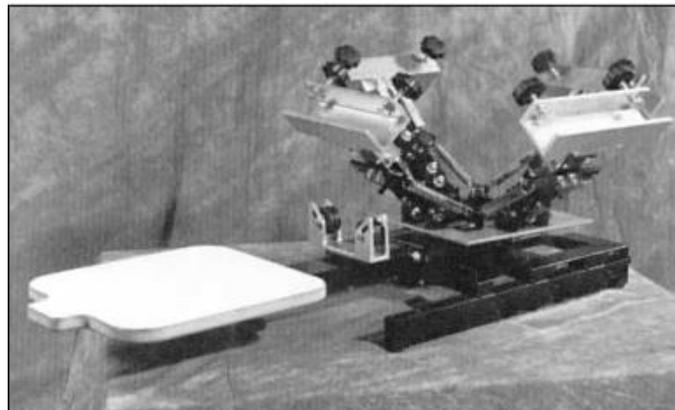


Figura 45 Mesa de 4 Colores Impresora Serigráfica

Fuente: (Tyler, 2014)

2.1.6.2. DISPOSITIVOS DE IMPRESIÓN AUTOMÁTICOS

Impresora automática Diamondback Series

La serie de Diamondback es la línea de máquinas de impresión automática de alto nivel de versátiles, recomendada para la introducción a las impresoras automáticas, altamente asequibles de M & R. Diamondbacks están disponibles con hasta 9 cabezales de impresión y en configuraciones

de 8 y 10 estaciones. Áreas de imagen máximas van desde 35 x 28 cm (14 "x 11") de 51 x 53 cm (20 "x 21"). Máquinas de impresión de pantalla Diamondback cuentan servo-accionado indexado para asegurar un desplazamiento suave, preciso y abrazaderas de pantalla neumáticas que facilitan una rápida carga de la pantalla, mantiene bastidores de rodillos sin necesidad de adaptadores especiales, y entregar una excelente estabilidad en una amplia variedad de pantallas. Cada máquina de serigrafía tiene cabezales accionados neumáticamente; escobilla de goma neumática / cubre tintas, abrazaderas con ajuste de ángulo sin herramientas; pinzas neumáticas marco de la pantalla; y reguladores de presión neumáticas escobilla de goma con medidores de presión en cada cabezal de impresión para un control excepcional de la presión de impresión.



Figura 46 Impresora Diamondback

Fuente: (M&RCompanies, 2013)

Detalles:

Carrusel

- Giro horario y anti horario.

Centro de control

- El programa de cuenta regresiva indica cuando el seteo del operador se ha alcanzado.
- Panel de control con pantalla táctil con etiquetado basado en iconos donde se puede visualizar información y comandos en varios idiomas.

- Configuración de inicio de impresión / acabado de impresión independiente, activa y detiene automáticamente los cabezales al inicio y al final de carreras de serigrafía.
- Mantenimiento Minder System™ alerta a los operadores cuando el mantenimiento programado se debe realizar.
- Múltiple capacidad de estilo de impresión (1-9).
- Autodiagnóstico.
- Proporciona control de la funcionalidad multi-impresión.
- Real-time de los datos de producción.

Impresora automática Sportsman EX

El Sportsman EX es más sofisticado que el Diamondback, ofrece impresoras de un valor excepcional y de alta calidad. La versión EX 1618 está disponible en 6, 8 y 10 colores con un área de imagen máxima de 41 x 46 cm (16" x 18"). La versión EX 2020 está disponible en 6, 8, 10 y 12 colores con un área de imagen máxima de 51 x 51 cm (20" x 20").

Todas las máquinas de impresión de pantalla Sportsman EX cuentan con cabezales de impresión eléctricos, indexadores servo-accionados, capacidad de impresión tiempos múltiples, y una nueva interfaz de pantalla táctil en color con pantallas gráficas y etiquetado basado en iconos que pueden mostrar información y comandos en varios idiomas, lo que simplifica la serigrafía y la formación en cualquier parte del mundo. También se incluye a bordo de auto-diagnóstico y visualización de los datos de producción en tiempo real. Deportista EX 5070 cuenta con cabeza de apoya y fortalecimiento de los brazos de paletas para mayor estabilidad.



Figura 47 Impresora Sportsman serie EX

Fuente: (M&RCompanies, 2013)

Cuenta con pantalla digital para el ajuste de velocidades fáciles y precisas de la rasqueta. Cuenta con fuera de contacto central que permite el ajuste rápido de todas las estaciones al mismo tiempo. El programa Revolver Print de M & R TM opera automáticamente los cabezales individualmente en secuencia programada y permite el semicurado múltiple sin perder la posición de impresión. Las características opcionales incluyen M & R óptico de camisas del detector, lo que minimiza los errores de impresión y pulse paro que resultan de incorrecta de las camisetas de carga. Con su pantalla táctil fácil de usar y extenso conjunto estándar-estelar, Sportsman EX de impresión automática son ideales para aquellos que buscan rentabilidad y versatilidad sin precedentes.

Detalles:

Carrusel

- Puede girar en sentido horario o anti horario.
- Tiene capacidad de rueda libre.

Centro de control

- El programa de cuenta regresiva indica cuando el seteo del operador se ha alcanzado.
- Panel de control con pantalla táctil con etiquetado basado en iconos donde se puede visualizar información y comandos en varios idiomas.

- Configuración de inicio de impresión / acabado de impresión independiente, activa y detiene automáticamente los cabezales al inicio y al final de carreras de serigrafía.
- Mantenimiento Minder System™ alerta a los operadores cuando el mantenimiento programado se debe realizar.
- Múltiple capacidad de estilo de impresión (1-9).
- Autodiagnóstico.
- Proporciona control de la funcionalidad multi-impresión.
- Real-time de los datos de producción.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA MÁQUINA SERIGRÁFICA AUTOMATIZADA

3.1. DISEÑO MECÁNICO

3.1.1 ESQUEMA DE LA MÁQUINA SERIGRÁFICA AUTOMATIZADA

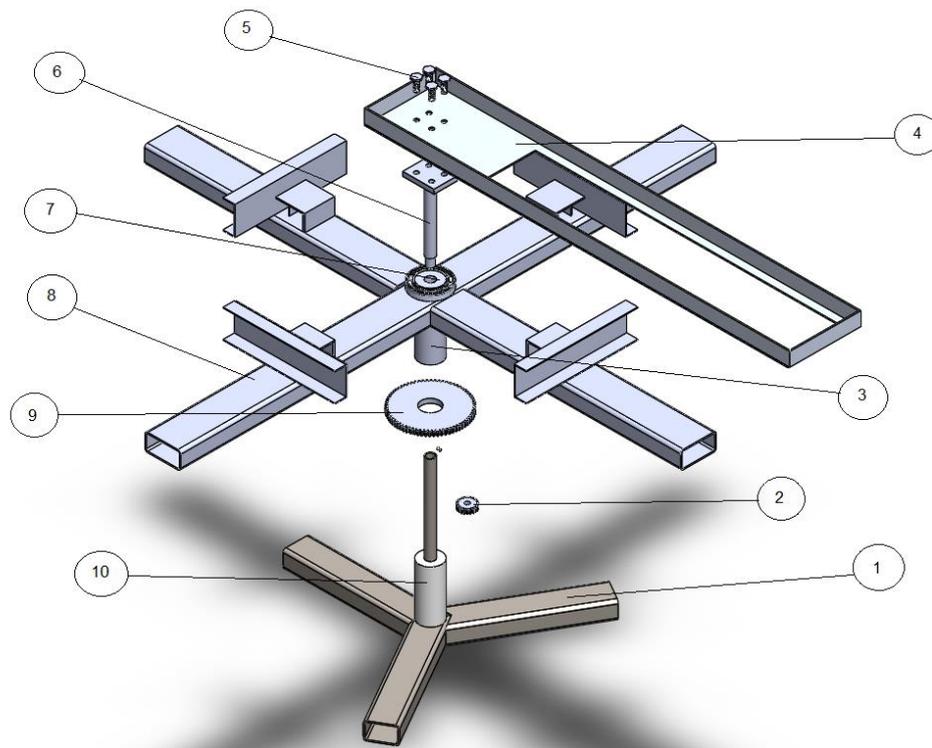


Figura 48 Esquema general de la máquina serigráfica automatizada

La estación de máquina serigráfica automatizada consta de las siguientes partes:

- 1) Base triangular.
- 2) Piñón.
- 3) Eje del Engrane.
- 4) Brazo de Impresión.
- 5) Pernos de Sujeción Brazo de Impresión – Soporte.
- 6) Soporte del Brazo de Impresión.

- 7) Rodamiento.
- 8) Brazos giratorios.
- 9) Engrane
- 10) Base Cilíndrica.

3.1.2 ANÁLISIS DE CARGAS ESTÁTICAS

El esquema general de la estación de la máquina serigráfica automatizada se ha dividido en varios diagramas de cuerpo libre para poder simplificar los cálculos y de esta manera comprender mejor a los mismos. El primer diagrama de cuerpo libre a estudiar es el de los brazos giratorios que se muestra en la figura 49.

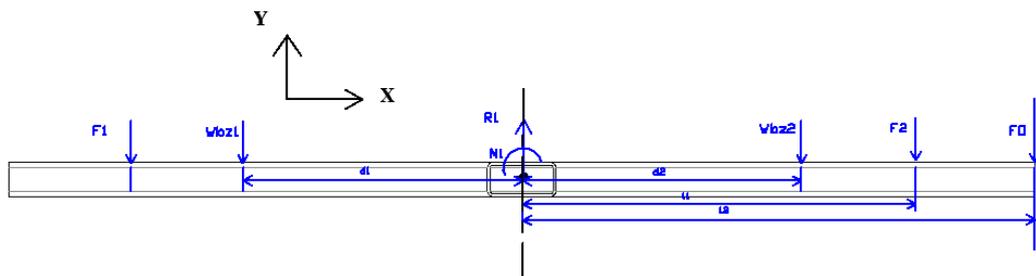


Figura 49 Diagrama de cuerpo libre de los brazos giratorios.

Realizando las sumatorias respectivas de las fuerzas se obtiene los siguientes cálculos.

$$\sum Fy = 0$$

$$R_1 = F_1 + F_2 + W_{bz1} + W_{bz2} + F_0$$

Ecuación 1

F_1 y F_2 son los pesos de los marcos ubicados en el centro de su masa de aplicación a una distancia l_1 del centro de gravedad de los brazos.

R1 es la reacción localizada en el centro de los brazos. W_{bz1} y W_{bz2} siendo el peso de cada brazo ubicados en el centro de su área de aplicación a una distancia d_1 del centro.

F_o es una fuerza ocasional de operación.

Para el análisis se tomaron las siguientes consideraciones:

$$F1 = F2 = Fmr \quad \text{Ecuación 2}$$

$$W_{bz1} = W_{bz2} = W_b \quad \text{Ecuación 3}$$

Fmr es el peso de cada marco y W_b es el peso de cada brazo giratorio. Por lo tanto R1 tiene el siguiente valor:

$$R1 = 4 (Fmr + W_b) + F_o \quad \text{Ecuación 4}$$

Análisis del engranaje de dientes rectos:

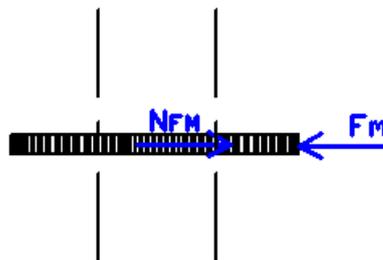


Figura 50 Diagrama de cuerpo libre del engranaje

$$\sum F_x = 0$$

$$N_{FM} = Fm$$

Ecuación 5

En donde Fm es la fuerza tangencial que se genera en el engranaje debido al torque y N_{FM} es la normal a la misma.

Análisis del eje del engrane:

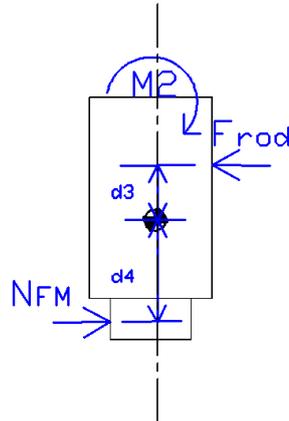


Figura 51 Diagrama de cuerpo libre del eje del engrane.

$$\sum F_x = 0$$

$$N_{FM} = F_{rod}$$

Ecuación 6

$$\sum M = 0$$

$$M_2 - N_{FM} * d_4 - F_{rod} * d_3 = 0$$

Ecuación 7

La fuerza N_{FM} es conocida, F_{rod} es la fuerza de reacción del rodamiento superior, d_3 es la distancia del centro del eje a la fuerza F_{rod} y d_4 es la distancia del centro del eje a la fuerza N_{FM} .

Análisis del rodamiento:

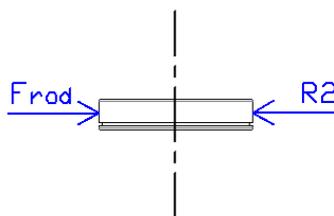


Figura 52 Diagrama de cuerpo libre del rodamiento.

$$\sum F_x = 0$$

$$R_2 = F_{rod}$$

Ecuación 8

R_2 es la normal generada sobre el rodamiento para contrarrestar la fuerza generada F_{rod} .

Análisis de la base de la estructura:

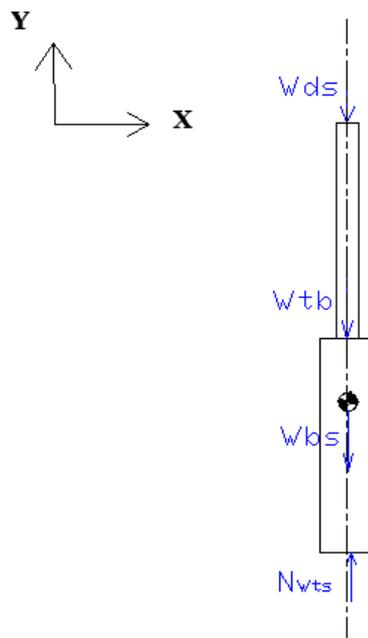


Figura 53 Diagrama de cuerpo libre de la base cilíndrica

$$\sum F_y = 0$$

$$W_{ds} + W_{tb} + W_{bs} = N_{Wts}$$

Ecuación 9

W_{ds} es el peso del brazo de impresión añadido 500 [N] por una sobrecarga debido al error de un operador, W_{tb} es el peso total del brazo rotatorio incluyendo los pesos de los rodamientos, y del eje del engranaje, W_{bs} es el peso de la base en forma cilíndrica de dos secciones. N_{Wts} es la normal que reacciona sobre la base triangular.

Análisis de la base principal:

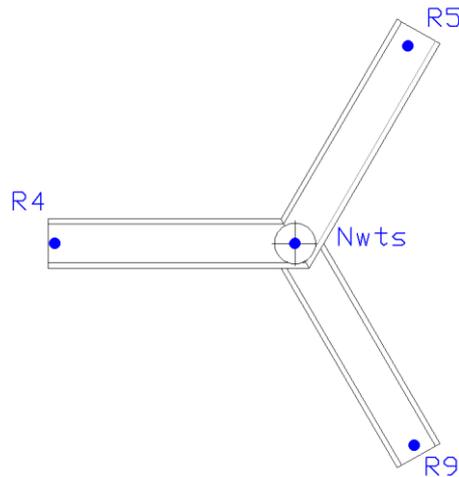


Figura 54 Diagrama de cuerpo libre de la base principal de 3 patas

$$\sum Fy = 0$$

$$R_4 + R_5 + R_9 = N_{Wts} + W_{b2}$$

Ecuación 10

En donde N_{wts} es la normal resultante del peso de toda la maquina sobre la base de 3 patas, R_4, R_5, R_9 las reacciones sobre los soportes de la base. Y W_{b2} es el peso propio de la base triangular. Se considera que la base está balanceada ya que sus apoyos se encuentran ubicados formando de un triángulo equilátero, por lo que R_4, R_5, R_9 tendrán los mismos valores, y se obtiene la ecuación 11.

$$3R_4 = N_{Wts} + W_{b2}$$

Ecuación 11

$$R_4 = \frac{(N_{Wts} + W_{b2})}{3}$$

Análisis del brazo de impresión:

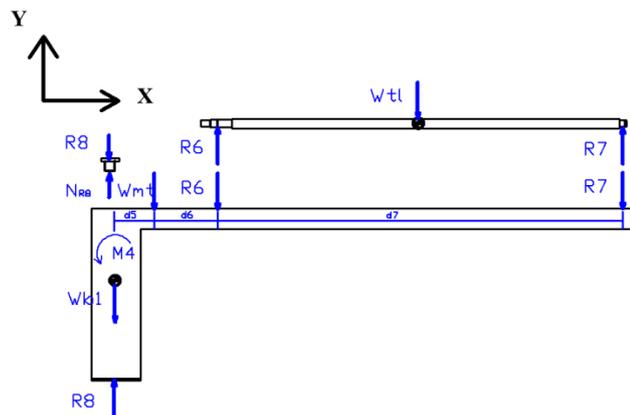


Figura 55 Diagrama de cuerpo libre del brazo de impresión.

$$\sum F_y = 0$$

$$W_{tl} = R_6 + R_7$$

Ecuación 12

$$R_8 = R_6 + R_7 + W_{mt} + W_{b1} + 500$$

Ecuación 13

W_{tl} es el peso del tornillo de bolas. R_6 , R_7 son las reacciones que se generan sobre los cojinetes que soportan el tornillo de bolas. W_{mt} es el peso del motor, W_{b1} es el peso del soporte del brazo de impresión.

R_8 es la reacción sobre la base que soporta el brazo de impresión y N_{R8} es la normal resultante al perno que une el soporte con el brazo de impresión, donde 4 pernos son los que soportan el brazo de impresión.

$$N_{R8} = \frac{R_8}{4}$$

Ecuación 14

$$\sum M = 0$$

$$M_4 - W_{mt} * d_5 - R_6 * (d_5 + d_6) - R_7 * (d_5 + d_6 + d_7)$$

$$-500 * (d_5 + d_6 + d_7) = 0$$

Ecuación 15

En donde M_4 es el momento que se genera en la estructura del brazo de impresión, d_5, d_6, d_7 son las distancias de las fuerzas con respecto al punto donde está sujeta la estructura.

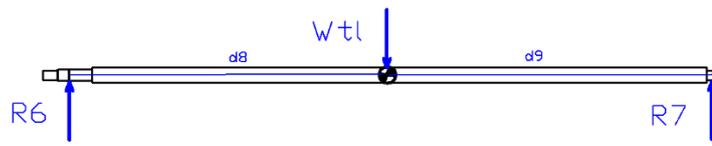


Figura 56 Diagrama de cuerpo libre del eje del husillo de bolas.

De acuerdo al DCL de la figura 56, obtenemos la siguiente ecuación:

$$\sum M = 0$$

$$R_6 * d_8 = R_7 * d_9$$

Ecuación 16

Donde d_8 y d_9 son conocidos al ser las distancias del centro de gravedad del eje del husillo de bolas a los cojinetes.

Una vez obtenidas todas las ecuaciones de cada diagrama de cuerpo libre de los elementos que conforman la máquina serigráfica automatizada, se las ingresa a un software de ingeniería para obtener los valores respectivos de todas las fuerzas, momentos y reacciones.

Resultados:

$$R_1 = 1274.4 [N]$$

$$R_4 = 847.24 [N]$$

$$R_5 = 88.58 [N]$$

$$R_6 = 21.53 [N]$$

$$R_7 = 18.46 [N]$$

$$R_8 = 1346.74 [N]$$

$$R_9 = 88.58 [N]$$

$$R_2 = 125 [N]$$

$$Fmr = 19.6 [N]$$

$$Nfm = 125 [N]$$

$$\begin{aligned}
 F_{rod} &= 125 [N] & N_{wts} &= 2247.7 [N] \\
 N_{R8} &= 336.68 [N] & W_{tb} &= 1372.4 [N] \\
 W_{ds} &= 826.34 [N] & W_{ts} &= 2247.7 [N] \\
 W_{mt} &= 21.56 [N] & & \\
 M_1 &= 600 [Nm] & M_2 &= 25.31 [Nm] \\
 M_4 &= 451.67 [Nm] & &
 \end{aligned}$$

3.1.3. DISEÑO DEL MECANISMO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA MOTOR – ENGRANE

Para el diseño del mecanismo de transmisión de potencia del motor al engrane, se vio la necesidad de encontrar el torque mínimo que debe entregar el motor para que todo el sistema de brazos giratorios se muevan con una aceleración angular de $\pi/4$ [rad/s²]. Por lo que se recurrió a utilizar la siguiente expresión:

$$\tau_{min} = I * \alpha \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

- τ_{min} : es el momento mínimo aplicado al cuerpo (brazos giratorios).
- I : es el momento de inercia del cuerpo (brazos giratorios) con respecto al eje de rotación.
- α : es la aceleración angular

Se consideró además a todo el sistema de brazos giratorios como un cuerpo rígido con forma de disco, con un radio de 0.6 [m] y una masa de 35 [kg], con lo que se procedió a calcular su momento de inercia con la siguiente expresión:

$$I_{cuerpo} = \frac{M_{cuerpo} * R^2}{2} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$I_{cuerpo} = \frac{35 [kg] * 0.6[m^2]}{2}$$

$$I_{cuerpo} = 6.3 [kg * m^2]$$

Reemplazando el momento de inercia obtenida y el valor de la aceleración angular en la Ecuación 17, encontramos el valor del torque mínimo.

$$\tau_{min} = 6.3 [kg * m^2] * \frac{\pi}{4} \left[\frac{rad}{s^2} \right]$$

$$\tau_{min} = 4.95 [N * m]$$

Debido a la optimización de recursos, se empleó un motor de 3 [Nm] y un sistema de engranaje de reducción, cuyo diseño se muestra a continuación, para alcanzar el torque necesario para movilizar el sistema de brazos giratorios.

3.1.3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE REDUCCION PIÑÓN - ENGRANE

Se va a partir de que los engranes serán diseñados para módulo 1, debido a su costo de manufactura barato y poder contar con mayor número de dientes, para una mejor resolución de posicionamiento.

Etapa de Reducción

El número de dientes de los engranes de la etapa de reducción, es:

$$N_p = 48 \text{ dientes} \qquad N_c = 112 \text{ dientes}$$

El cálculo de los diámetros primitivos de los engranes son:

$$d = m * N$$

$$d_p = m * N_p = 1 * 48 = 48 [mm]$$

Ecuación 19

$$d_c = m * N_c = 1 * 112 = 112 \text{ [mm]} \quad \text{Ecuación 20}$$

El factor de reducción del engranaje se calcula de la siguiente manera:

$$e = \frac{N_c}{N_p} = \frac{112}{48} = 2.33 \quad \text{Ecuación 21}$$

Con los datos obtenidos se verifica que el número de dientes seleccionado sea mayor al mínimo para que estén libres de interferencia.

$$N_m = \frac{2k}{(1+2e) * \text{sen}^2 \phi} * (e + \sqrt{e^2 + (1 + 2e) * \text{sen}^2 \phi}) \quad \text{Ecuación 22}$$

k=1 factor que representa dientes de profundidad completa.

ϕ es el ángulo de presión igual a 20°.

Reemplazando los valores en la ecuación 24 tenemos:

$$N_m = \frac{2*1}{(1+2*2.33) * \text{sen}^2 20} * (2.33 + \sqrt{2.33^2 + (1 + 2 * 2.33) * \text{sen}^2 20}) = 14.49 \text{ dientes}$$

Por lo que se verifica que los 48 dientes del piñón están bien diseñados para un engranaje con una rueda de 112 dientes ya que sobre pasa el mínimo requerido.

Selección del material del engranaje

El material del cuál serán el piñón y engrane es de la familia de los aceros al medio carbón, debido a sus propiedades que permiten tener una buena combinación entre dureza y tenacidad para altos ciclos de trabajo.

Tabla 8 Matriz de selección del material del engranaje

Material	Aplicación	Límite de Fluencia	Costo	Disponibilidad
AISI 1020	Fabricación de piezas estructurales de mediana resistencia.	210 [MPa]	Bajo	Mediana
AISI 4620	Fabricación de piezas de alta resistencia	370 [MPa]	Bajo	Mediana
AISI 4140	Fabricación de piezas de medianas dimensiones que exigen elevada dureza	690 [MPa]	Alto	Baja
AISI 4340	Fabricación de partes que están sometidas a muy altos esfuerzos dinámicos	470 [MPa]	Mediano	Mediana

Criterios a evaluar.

Los criterios a evaluar en la matriz de selección tendrán valores diferentes, los cuales sumados darán 100 puntos. De esta manera el material con mayor puntaje será el que mejor cumple con los requisitos para la fabricación. Los criterios a ser evaluados son:

- **Resistencia:** A este criterio se asignó un valor de 25 puntos, siendo el valor más alto para el material que cumpla una mayor resistencia a la fatiga.
- **Corrosión:** A este criterio se asignó un valor de 20 puntos, siendo el valor más alto al material que más se oponga a la corrosión.
- **Costo:** A este criterio se asignó un valor de 30 puntos, siendo el valor más alto al material cuyo precio por volumen sea el más económico.

- **Disponibilidad:** A este criterio se asignó un valor de 25 puntos, siendo el valor más alto al material que sea más asequible en el mercado actual.

Tabla 9
Criterios a evaluar para la selección del material del engranaje

No	Criterio a Evaluar	Símbolo	Valoración
1	Resistencia	R	25
2	Corrosión	C	20
3	Costo	Cs	30
4	Disponibilidad	D	25
Total:			100

Una vez establecidos los criterios a evaluar con sus respectivas valoraciones se procede a realizar la tabla de evaluación de los materiales para la construcción del engranaje, siendo el de mayor puntaje el seleccionado.

Tabla 10
Criterios evaluados para la selección del material del engranaje

SISTEMA		CRITERIOS					TOTAL
	Tipos	R	C	Cs	D		
Materiales para construcción del engranaje	AISI 1020	15	15	25	18	73	
	AISI 4620	20	15	20	18	73	
	AISI 4140	25	15	15	15	70	
	AISI 4340	22	15	25	18	80	

De acuerdo a la tabla 10, se puede apreciar que el material que tiene las características más adecuadas para la fabricación del engrane y piñón es el AISI 4340, obteniendo el mejor puntaje dentro de la matriz de selección.

Mediante el diagrama de dureza brinell vs esfuerzo admisible para aceros de templado total, se puede obtener el número de esfuerzo de contacto admisible del material seleccionado con grado 2 de dureza: 349 HB. Como resultado tenemos $S_{ac} = 1060 [MPa]$, ver figura 57.

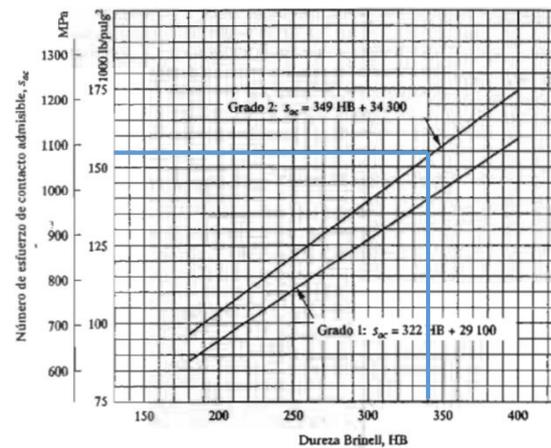


Figura 57 Diagrama de dureza brinell vs esfuerzo admisible para aceros de templado total

Fuente: (Mott, 2006)

Para el diseño del piñón y la corona se desarrolló una tabla de diseño en un software CAD como se observa en la figura 58.

	A	B	C	D	E	F	G
	Tabla de diseño para: Engranaje						
		MDL@Croquis1					
		N@Croquis1					
		PA@Croquis1					
		D1@MatrizC3					
	Predeterminado	1,5	40	15	40		
	MDL 2 N70 PA 20 D1 70	2	70	20	70		
	MDL 2 N12 PA 20 D1 12	1,5	70	15	70		
	MDL 2 N70 PA 15 D1 70	2	70	15	70		
	MDL 2 N35 PA 15 D1 35	2	35	15	35		
	MDL 2 N70 PA 20 D1 70	2	70	20	70		
	MDL 3 N70 PA 20 D1 70	3	70	20	70		
	MDL 2 N35 PA 20 D1 70	2	35	20	35		

Figura 58 Tabla de diseño de engranes en CAD

Los parámetros introducidos para el diseño de los engranes son:

- El módulo de los engranes ($m=1$).

- El número de dientes ($N_p=48$ dientes y $N_c= 112$ dientes).
- El ángulo de presión (20 grados).

Donde una vez ingresado los valores en la tabla de diseño este nos generan automáticamente los valores de los parámetros que tendrán los engranes, estos parámetros generados son:

- Diámetro exterior.
- Diámetro de base.
- Diámetro de raíz.
- Ancho de cara del diente.
- Addendum.
- Dedendum.

De esta manera las características del piñón son las siguientes:

Tabla 11
Parámetros del piñón

Parámetros	Valores
Dp	48 [mm]
Z1	48
m	1
F	15 [mm]
ang.presión	20°

El engrane cuenta con las siguientes características:

Tabla 12
Parámetros del engrane

Parámetros	Valores
Dp	112 [mm]
Z1	112
m	1
F	15 [mm]
ang.presión	20°

D_p es el diámetro de paso, m el módulo, F el ancho de cara y Z el número de dientes.

Los cálculos de esfuerzo de contacto y de esfuerzo último de tensión del engranaje, se muestran a continuación.

$$\sigma_t = \frac{wt}{F*m*J} * \frac{ka*ks*km*kb*ki}{kv} \quad \text{Ecuación 23}^1$$

Donde:

- σ_t es el esfuerzo de tensión.
- wt es la fuerza tangencial que se genera en el engrane debido al torque.
- ks es el factor de tamaño para resistencia a la flexión.
- km es el factor de distribución de carga para resistencia a la flexión.
- kb es el factor de espesor de aro.
- ki es el factor de engrane intermedio.
- F es el ancho del diente.
- m es el módulo.
- J es el factor geométrico para resistencia a la flexión.
- kv es el factor dinámico para resistencia a la flexión.

- **Factor geométrico de resistencia a flexión J:**

En base a la siguiente tabla de valores del Factor de forma de Lewis de la AGMA se tiene que para un piñón de 48 dientes se tiene J igual a 0.405 (por interpolación), y para un engrane de 112 dientes, J igual a 0.447 (por interpolación).

Tabla 13
Valores del Factor de Forma J de Lewis

¹ (Norton, 2011)

NUMERO DE DIENTES	Y	NUMERO DE DIENTES	Y
12	0.245	28	0.353
13	0.261	30	0.359
14	0.277	34	0.371
15	0.290	38	0.384
16	0.296	43	0.397
17	0.303	50	0.409
18	0.309	60	0.422
19	0.314	75	0.435
20	0.322	100	0.477
21	0.322	150	0.460
22	0.331	300	0.472
24	0.337	400	0.480
26	0.346	Cremallera	0.485

Interpolación = 0.405

Interpolación = 0.447

Fuente: (Budinas & Nisbett, 2011)

- **Factor dinámico Kv:**

El factor dinámico Kv toma en consideración cargas por vibración generadas internamente por los impactos entre los dientes que son inducidos por acoplamiento no conjugados.

$$V_t = \frac{[A+(Q_v-3)]^2}{200} \quad \text{Ecuación 24}^2$$

Vt es la velocidad en la línea de paso del acoplamiento de engranes en m/s. Mientras que el factor A se obtiene mediante la ecuación 25.

$$A = 50 + 56(1 - B) \quad \text{Ecuación 25}$$

El factor B se obtiene mediante la ecuación 26. Con índices de calidad entre: $6 \leq Q_v \leq 11$.

$$B = \frac{(12-Q_v)^{2/3}}{4} \quad \text{Ecuación 26}$$

² (Norton, 2011)

Donde Q_v es el índice de calidad del engrane de menor calidad en el acoplamiento que de esta manera tendrá un valor de 6, reemplazando en la ecuación 26 obtenemos lo siguiente:

$$B = \frac{(12 - 6)^{2/3}}{4} = 0.825$$

Donde posteriormente se reemplaza el valor de B en la ecuación 25.

$$A = 50 + 56(1 - 0.825) = 59.8$$

Y finalmente se reemplaza los valores de A y B en la ecuación 24 obtenemos V_t .

$$V_t = \frac{[59.8 + (6 - 3)]^2}{200}$$

$$V_t = 19.72 \text{ [m/s]}$$

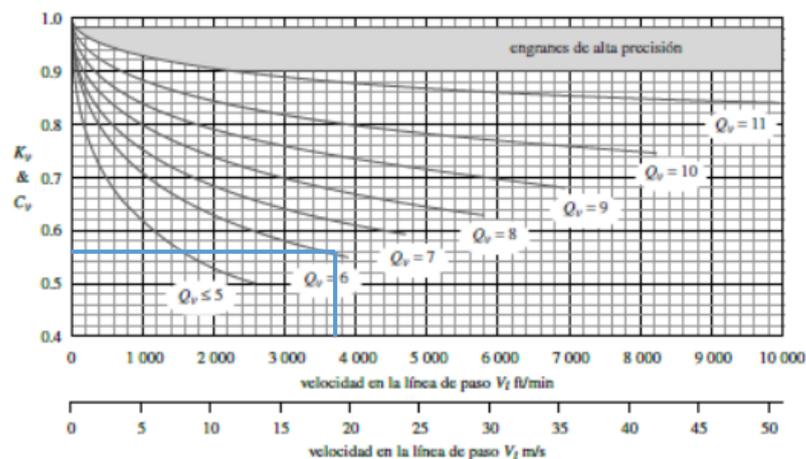


Figura 59 Factores dinámico K_v y C_v de AGMA

Fuente: (Norton, 2011)

De donde el valor de K_v es igual a 0.55 después de haber buscado en la figura 59 mediante los valores de V_t y Q_v .

- **Factor de distribución de carga K_m :**

De acuerdo a Norton (2011) “Cualquier desalineación o desviación axiales en la forma del diente causan que la carga transmitida W_t se distribuya desigualmente sobre el ancho de la cara de los dientes del engrane. El problema se acentúa en las caras con anchos más grandes. Un modo aproximado y conservador, para tomar en cuenta la menor distribución uniforme de la carga, consiste en aplicar el factor K_m para incrementar los esfuerzos de los mayores anchos de cara” (Diseño de máquinas, p. 577)

Para obtener el valor de K_m nos basamos en la tabla 14, que nos entrega un valor de $K_m = 1.6$ por tener un ancho de cara menor a los 50 [mm]

Tabla 14
Factores de distribución de carga K_m

Factores K_m de distribución de carga		
Ancho de cara In (mm)		K_m
<2 (50)		1.6
6 (150)		1.7
9 (250)		1.8
≥ 20 (500)		2.0

Fuente: (Norton, 2011)

- **Factor de aplicación K_a :**

De acuerdo a Norton (2011) “Si la maquina impulsora o la impulsada tienen torques o fuerzas que varían con el tiempo, éstos incrementarían la carga sostenida por el diente del engrane por encima de los valores medios.”(Diseño de máquinas, p.577).

Para obtener el valor de K_a nos basamos en la tabla 15.

Tabla 15
Factores de aplicación K_a

Aplicación de factores K_a			
Máquina impulsora	Máquina impulsada		
	Uniforme	Impacto moderado	Impacto fuerte
Uniforme (motor eléctrico, turbina)	1.00	1.25	1.75 o mayor
Impacto suave (motor de varios cilindros)	1.25	1.50	2.00 o mayor
Impacto medio (motor de un solo cilindro)	1.50	1.75	2.25 o mayor

Fuente: (Norton, 2011)

Para esta aplicación la máquina impulsadora es un motor eléctrico con movimiento uniforme, por lo que se obtiene un valor de K_a igual a 1.

- **Factor de tamaño K_s :**

El factor K_s permite la modificación del esfuerzo en el diente para tomar en consideración las cargas cíclicas que producen fatiga. Todavía no se han establecido normas para factores de tamaño, por tal motivo es recomendable utilizar un valor de K_s igual a 1.

- **Factor de espesor del aro K_B :**

El factor K_B se implementa a fin de tomar en consideración situaciones en las cuales se emplean engranes de gran diámetro, se fabrica con aro y radios en vez de ser un disco sólido, con un aro de peralte reducido.

Para nuestro proyecto el diseño del piñón y corona no poseen arcos, sino que son discos sólidos, por tal motivo el factor K_B es igual a 1.

- **Factor de engrane intermedio o loco K_i :**

Por motivo de que el engranaje no cuenta de engranes locos, el valor de K_i será de 1.

Finalmente se calcula el valor de w_t que es la fuerza tangencial que se genera en la corona como en el piñón debido al torque, se utiliza la siguiente expresión.

$$w_t = \frac{\tau}{r} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde τ es el torque que se genera dentro del engrane y r es su radio.

$$w_t = \frac{7 [Nm]}{0.056 [m]}$$

$$w_t = 125 [N]$$

Una vez obtenidos todos los factores del engrane y el piñón respectivamente se procede a reemplazar los datos en la ecuación 23.

A continuación se obtiene el valor de esfuerzo de tensión en el piñón.

$$\sigma_t = \frac{125 [N]}{0.015 [m] * 0.001[m] * 0.405} * \frac{1 * 1 * 1.6 * 1 * 1}{0.55}$$

$$\sigma_t = 59.85 [MPa]$$

Al igual para el esfuerzo de tensión en el engrane:

$$\sigma_t = \frac{125[N]}{0.015 [m] * 0.001[m] * 0.447} * \frac{1 * 1 * 1.6 * 1 * 1}{0.55}$$

$$\sigma_t = 54.23 [MPa]$$

Como el esfuerzo último de tensión del material es 705 [MPa], se puede evidenciar que los engranes no fallarán, constatando un factor de seguridad de 11.77 aproximadamente para el piñón y 13 para el engrane.

Finalmente para el cálculo del esfuerzo de contacto se utiliza la siguiente expresión.

$$\sigma_C = C_p * \sqrt{\frac{C_a * C_s * C_m * C_f * \omega t}{C_v * F * D_p * I}} \quad \text{Ecuación 28}^3$$

- σ_C : es el esfuerzo de contacto.
- C_p : es el coeficiente elástico del material.
- C_a : es el factor de aplicación de la carga para resistencia al desgaste.
- C_s : es el factor de tamaño para resistencia al desgaste.
- C_m : es el factor de distribución de carga para resistencia al desgaste.
- C_f : es el factor de terminado superficial.
- C_v : es el factor dinámico para resistencia al desgaste.
- D_p : es el diámetro de paso del engrane.
- I : es el factor geométrico para resistencia al desgaste.

- **Factor de geometría superficial I:**

El factor de geometría superficial toma en consideración los radios de curvatura de los dientes del engrane y el ángulo de presión. Para obtener dicho factor en el engrane y en el piñón nos basamos en el diagrama del factor de geometría I para engranes rectos con respecto a la relación de engranaje, ver figura 60.

³ (Norton, 2011)

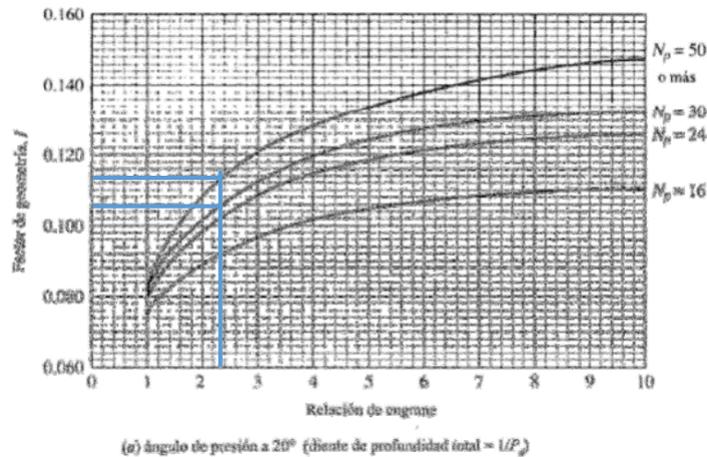


Figura 60 Diagrama del factor de geometría I para engranes rectos con respecto a la relación de engranes.

Fuente: (Mott, 2006)

De donde conociendo que la relación de los engranes es de 2.33, que el número de dientes del engrane es de 112 y el del piñón de 48, y que comparten el mismo ángulo de presión igual a 20°, se procede a obtener los valores del factor de geometría I correspondientes:

$$I_C = 0.112$$

$$I_P = 0.102$$

- **Coefficiente elástico C_p :**

El coeficiente elástico toma en consideración diferencias en el material del diente y se lo obtiene a partir del estándar 2001-B88 de la AGMA que muestra la tabla 16.

Tabla 16

Coefficiente Elástico AGMA C_p en unidades de $[\text{psi}]^{0.5}$ ($[\text{MPa}]^{0.5}$)

Material del piñón	Módulo de elasticidad del piñón E_p psi (MPa)*	Material y módulo de elasticidad de la corona E_g , lbf/pulg ² (MPa)*					
		Acero 30×10^6 (2×10^5)	Hierro maleable 25×10^6 (1.7×10^5)	Hierro nodular 24×10^6 (1.7×10^5)	Hierro fundido 22×10^6 (1.5×10^5)	Bronce al aluminio 17.5×10^6 (1.2×10^5)	Bronce al estaño 16×10^6 (1.1×10^5)
Acero	30×10^6 (2×10^5)	2 300 (191)	2 180 (181)	2 160 (179)	2 100 (174)	1 950 (162)	1 900 (158)
Hierro maleable	25×10^6 (1.7×10^5)	2 180 (181)	2 090 (174)	2 070 (172)	2 020 (168)	1 900 (158)	1 850 (154)
Hierro nodular	24×10^6 (1.7×10^5)	2 160 (179)	2 070 (172)	2 050 (170)	2 000 (166)	1 880 (156)	1 830 (152)
Hierro fundido	22×10^6 (1.5×10^5)	2 100 (174)	2 000 (168)	2 000 (166)	1 960 (163)	1 850 (154)	1 800 (149)
Bronce al aluminio	17.5×10^6 (1.2×10^5)	1 950 (162)	1 900 (158)	1 880 (156)	1 850 (154)	1 750 (145)	1 700 (141)
Bronce al estaño	16×10^6 (1.1×10^5)	1 900 (158)	1 850 (154)	1 830 (152)	1 800 (149)	1 700 (141)	1 650 (137)

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Como el material del piñón y del engrane son de acero, se obtiene un coeficiente elástico igual a $191 \text{ [MPa]}^{0.5}$.

- **Factor de terminado superficial C_f :**

El factor C_f se toma en consideración para acabados anormalmente ásperos en los dientes del engrane. AGMA aún no ha establecido normas para factores de acabado superficial y recomienda que el factor C_f sea igual a 1 para aquellos engranes que se fabrican mediante métodos convencionales, como del presente proyecto.

Para los factores C_a , C_m , C_s y C_v se consideran los mismos valores obtenidos para K_a , K_m , K_s y K_v .

De tal manera se obtiene el esfuerzo de contacto en el piñón reemplazando los valores en la ecuación 28.

$$\sigma_c = 191 \text{ [MPa]}^{0.5} * \sqrt{\frac{1 * 1 * 1.6 * 1 * 125 \text{ [N]}}{0.55 * 0.015 \text{ [m]} * 0.048 \text{ [m]} * 0.102}}$$

$$\sigma_c = 425.011 \text{ [MPa]}$$

Para encontrar el esfuerzo de contacto en el engrane:

$$\sigma_c = 191 \text{ [MPa]}^{0.5} * \sqrt{\frac{1 * 1 * 1.6 * 1 * 125 \text{ [N]}}{0.55 * 0.015 \text{ [m]} * 0.112 \text{ [m]} * 0.112}}$$

$$\sigma_c = 265.52 \text{ [MPa]}$$

El esfuerzo límite de contacto del material hallado en la figura 57 es igual a 1060 [MPa], por lo que se puede verificar que los engranes podrán trabajar sin ningún inconveniente, con un factor de seguridad de 2.5 para el piñón y un factor de 4 para el engrane.

3.1.4. DISEÑO DE LOS BRAZOS GIRATORIOS

Para el diseño de los brazos giratorios se considera las dimensiones de los camiseteros y de los marcos, ya que estos irán colocados sobre los brazos para que giren en conjunto. Las dimensiones del camisetero son de 400 x 550 [mm], es decir que cada brazo debe tener más de 550 [mm] de largo, por lo que se ha definido una longitud de 600 [mm].

Para comprobar que no exista interferencia entre las piezas que componen los brazos giratorios (marcos y camiseteros), se ha ensamblado todo el conjunto en Software CAD, ver figura 61.

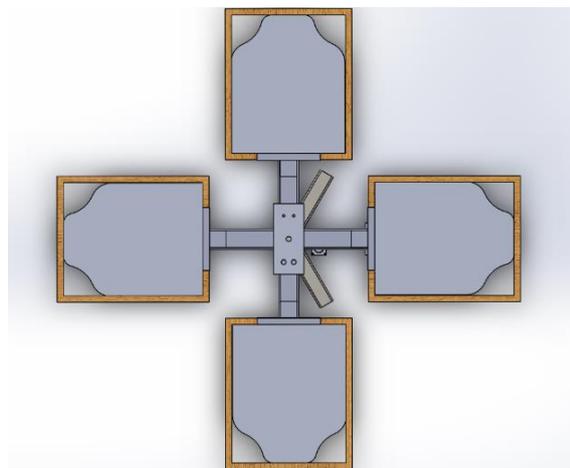


Figura 61 Ensamble de marcos, brazos y camiseteros

Una vez evidenciada la falta de interferencia entre los componentes, se planteó realizar los brazos de tubo de rectangular de 80 x 40 [mm].

Para este perfil preseleccionado fue necesario analizar los esfuerzos al que estará sometido debido a las cargas definidas en la sección 3.1.2, y de esta manera justificar la selección y añadir un factor de seguridad para proteger a la estructura por cualquier falla.

Consideramos que la unión de dos brazos giratorios conformará una sola viga, con lo que procedemos a realizar los diagramas de fuerzas cortantes y de momento flexionante mediante el software de Matlab cuya programación se muestra a continuación.

```
%Programa para el cálculo del momento máximo en los brazos giratorios
%Ingreso de datos
L=1.2; %Longitud de los dos brazos [m]
Fmr= 9.8*2; %Peso Marco con Soporte Incluido (N)
Wb= 9.8*5; %Peso de los cuatro brazos rotatorios (N)
Fo= 1000; %Fuerza ocasional producida por un operario (N)
R=2*(Fmr+Wb)+Fo;%Reacción Total

l2=0.6; %Distancia del centro de gravedad a Fo (m)
l1=0.4; %Distancia del centro de gravedad a F2 (m)
d2=0.3;%Distancia del centro de gravedad a Wbz2 (m)
i=1;
M1(1:1200)=0;
V1(1:1200)=0;
x=(0.001:L/1200:L);
for (d=0:0.001:1.2)
if(d<=0.2)
M1(i)=0;
V1(i)=-Fmr;
```

```

i=i+1;
end
if(d>0.2)&&(d<=l1)
M1(i)=- (Fmr+Wb)*d;
V1(i)=- (Fmr+Wb);
i=i+1;
end
if (d>l1)&&(d<=l2)
M1(i)=- (R-(Fmr+Wb))*d;
V1(i)=R-(Fmr+Wb);
i=i+1;
end
if (d>l2)&&(d<=(l2+d2))
M1(i)=- (R-(2*Wb+Fmr))*(2*l2-d);
V1(i)=R-(2*Wb+Fmr);
i=i+1;
end
if (d>(l2+d2))&&(d<=(l2+l1))
M1(i)=- (R-(2*Wb+2*Fmr))*(2*l2-d);
V1(i)=R-(2*Wb+2*Fmr);
i=i+1;
end
if (d>(2*l2))
M1(i)=0;
V1(i)=0;
i=i+1;
end
end
figure(1);plot(x,V1);
xlabel('X[m]');
ylabel('V[N]');
title('Fuerzas Cortantes en el eje');

```

```

grid on;
figure(2);plot(x,M1);
xlabel('X[m]');
ylabel('M[Nm]');
title('Momento flector en el eje');
grid on;

```

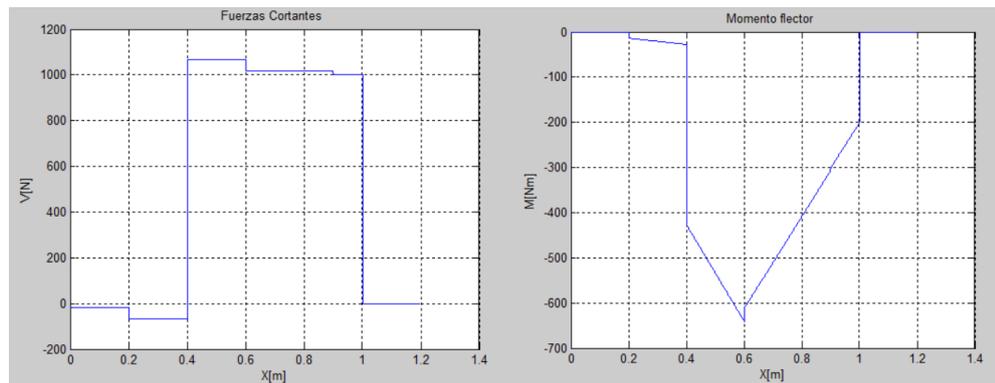


Figura 62 Diagrama de fuerzas cortantes y momento flector máximo en los brazos giratorios

Mediante la figura 62 se obtiene que el momento flector máximo es $M1_{max}$ es igual a -641.16 [Nm] con lo que se procede a calcular el esfuerzo flector que se tendrá sobre la viga:

$$\sigma_1 = M1_{max}/S_1 \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde S_1 es la sección transversal de la viga de tubo rectangular de $B=40$ [mm], $H=80$ [mm] y $t=3$ [mm] con $S_1=9.192 \times 10^{-6}$ [m³].

$$\sigma_1 = \frac{641.16[Nm]}{9.192 \times 10^{-6} [m^3]}$$

$$\sigma_1 = 69.75[MPa]$$

Por tal motivo el material del que serán los brazos giratorios es de tubo de acero rectangular A36 de espesor 80 x 40 [mm] de 3 [mm] de espesor, con

un esfuerzo a la fluencia de 250 [MPa], obteniendo un factor de seguridad de 3.58.

3.1.5. DISEÑO DEL EJE

Para el diseño del eje del engrane se toma en cuenta las dos secciones las cuales lo conformarán, la primera con el menor diámetro que es la que estará en contacto con la corona y la segunda sección la que estará en contacto con el rodamiento.

Para hallar el valor mínimo que debe tener el diámetro del eje para que no llegue a fallar debido a las fuerzas ejercidas que se observan en la figura 51, se procede a realizar el respectivo cálculo utilizando el método ASME B106.

El método emplea la siguiente ecuación:

$$d_{min} = \left\{ \frac{32 * FS}{\pi} * \left[\left(\frac{Kf * M_{max}}{S_n} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left(\frac{T_{max}}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 30}^4$$

Donde:

FS: es el factor de seguridad, según el estándar MIL no puede ser menor a 5.

Kf: es el factor de resistencia a la fatiga.

M_{max} : es el momento máximo del eje en [Nm].

T_{max} : es el torque máximo en el eje en [Nm].

S_y : es el esfuerzo ultimo de fluencia del material, en este caso 855 [MPa] correspondiente al AISI 4340 (VER ANEXO 1), material recomendado para ejes de engranes.

⁴ (Budynas & Nisbett, 2008)

S_n : es la resistencia a la fatiga.

Para los cálculos se considera que el acero AISI 4340 estará templado y revenido a 1200°F, por ser el que menor resistencia tiene con diferencia a los demás aceros AISI 4340 utilizados en otros procesos.

Se calcula el momento flector máximo al que estará sometido el eje, por tal motivo se realiza un análisis por fuerza cortante y momento flector por medio de un software de ingeniería.

Obteniendo como resultado las gráficas de fuerzas cortantes y momento flector en el eje del engranaje como se muestra en la figura 63.

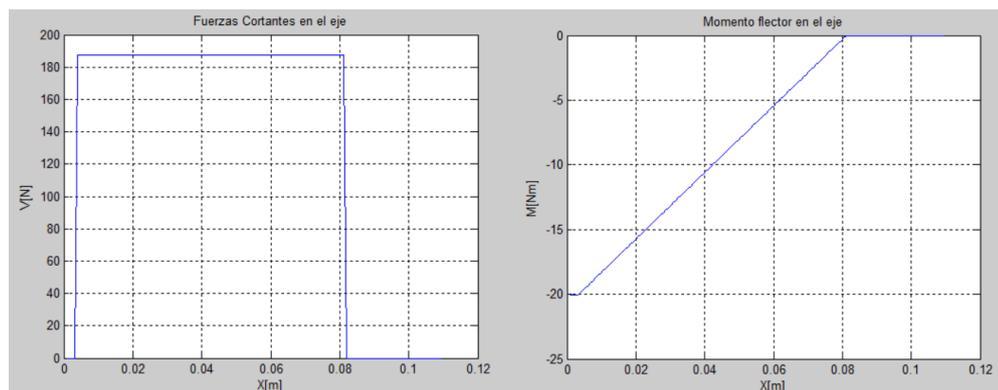


Figura 63 Graficas de los Diagramas de fuerza cortante y de momento flector en el eje

Donde se puede observar que el momento flector máximo a que está sometido el eje es de -20.06 [Nm].

El torque máximo al cual estará sujeto el eje es a 7 [Nm], que le transmitirá el piñón para que se genere el movimiento de giro de los cuatro brazos.

Se calcula la resistencia a la fatiga con la siguiente expresión:

$$S_n = S'_n * C_m * C_{st} * C_r * C_s \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde S'_n es el límite de resistencia a la fatiga igual a $0.5 S_{ut}$ para aceros que tengan un valor de S_{ut} menor a los 1400 [MPa].

El acero a emplear es el AISI 4340, este acero tiene un esfuerzo último a la tensión igual a 965 [MPa]. De esta manera $S'_n = 482.5$ [MPa].

C_m : Es el factor del material, cuyo valor es 1 dado que es un acero de alta calidad, forjado y con tratamiento térmicos.

C_{st} : Es el factor de tipo de esfuerzo, cuyo valor es 1 para flexión.

C_r : Es el factor de confiabilidad del material, de acuerdo a la fuente del material se puede establecer un 88%.

C_s : Es el factor de tamaño, para el cálculo de este factor se asume un diámetro de 30 [mm], de esta manera $C_s = 0.9$, según Shigley.⁵

$$S_n = 482.5 [MPa] * 1 * 1 * 0.88 * 0.9$$

$$S_n = 382.14 [MPa]$$

El valor de k_f se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$K_f = 1 + q * (k_t - 1) \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde q es un factor de sensibilidad a ranuras o muescas, y se calcula en base al radio del filete del hombro del eje, en la figura 64.

⁵ (Budinas & Nisbett, 2011)

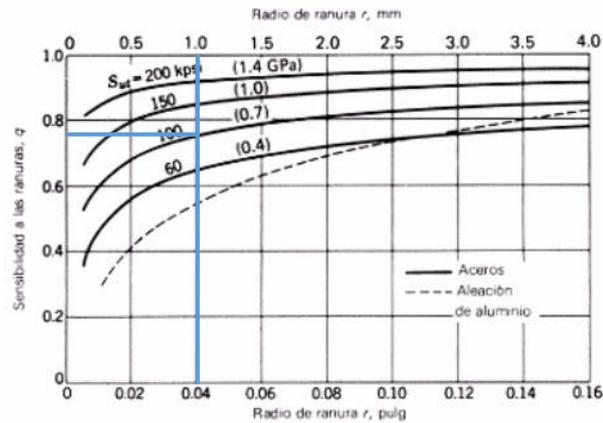


Figura 64 Diagrama de sensibilidad a la muesca para aceros.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

El radio del filete del hombro del eje es de 1 [mm] y S_{ut} es de 965 [MPa], con estos valores encontramos que el valor de q es de 0.75.

K_t es el factor teórico de concentración de esfuerzos, este depende de la configuración geométrica de la pieza y del tipo de carga aplicada. Para este caso se tiene una flecha sujeta a flexión por lo que el valor de k_t se obtiene en base a la figura 65.

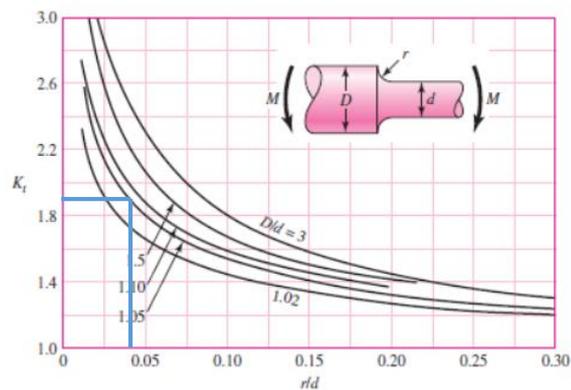


Figura 65 Factor de concentración de esfuerzos geométrico K_t para una flecha con un filete de hombro a flexión.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Para obtener el valor de k_t , es necesario conocer el diámetro de mayor y menor tamaño de la flecha, para este caso se asumirá un $d = 22$ [mm] y un $D = 25$ [mm].

Con estos valores se obtiene un valor de $k_t = 2$, y se reemplaza en la Ecuación 32 para encontrar k_f .

$$K_f = 1 + 0.75 * (2 - 1)$$

$$K_f = 1.75$$

Finalmente se calcula el valor del diámetro reemplazando todos los valores en la Ecuación 30.

$$d_{min} = \left\{ \frac{32 * 5}{\pi} * \left[\left(\frac{1.75 * 20.06 [Nm] * 1000}{382.14 [MPa]} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left(\frac{7 [Nm] * 1000}{855 [MPa]} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d_{min} = 17.34 [mm]$$

Obteniendo el diámetro mínimo del eje del engrane se selecciona un diámetro de 22 [mm] para la primera sección superior a los 17.34 [mm] del mínimo requerido, mientras que la segunda sección será diseñada en función de las especificaciones del rodamiento.

3.1.6. DISEÑO DE LA BASE CILINDRICA

Para el diseño de la base cilíndrica se considera las dimensiones del eje, además del efecto que produjese la carga ocasional propuesta en la sección 3.1.2.

Teóricamente la carga ocasional trataría de distribuir todo el peso de los componentes del brazo de impresión y del eje al extremo de la sección de la base, analizada en este momento como columna, produciendo una carga excéntrica.

Conociendo que cualquier carga excéntrica produce flexión en una columna, se calcula la deflexión máxima y el esfuerzo máximo y se analiza que estos valores no excedan el rango máximo permitido.

Las dimensiones de la sección de la base cilíndrica son: diámetro de 50 [mm] y una altura de 200 [mm]. El material de fabricación es de aleación de aluminio 1060 – H12.

Por lo tanto:

- $L=200$ [mm].
- Módulo de elasticidad del material, $E=69000$ [MPa]
- Esfuerzo permisible, $\sigma_{perm} = 75$ [MPa].

Calculamos la carga que soportará la columna, utilizando un factor de seguridad de 5.

$$P = 5 * (Wtb + Wds) \quad \text{Ecuación 33}$$

$$P = 5 * 2198.74 \text{ [N]}$$

$$P = 10993.7 \text{ [N]}$$

Utilizando la fórmula de Euler, calculamos la carga crítica sobre la columna.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * EI}{L^2} \quad \text{Ecuación 34}$$

De donde necesitaremos encontrar el valor de la Inercia con la siguiente expresión:

$$I = \frac{\pi d_o^4}{64} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$I = 306796.15 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * (69\,000 \text{ [MPa]}) * (306796.15 \text{ [mm}^4\text{]})}{(200 \text{ [mm]})^2}$$

$$P_{cr} = 5223225.191 [N]$$

Utilizando la fórmula de la secante, encontramos el valor de la deflexión máxima.

$$y_{max} = e \left[\sec \left(\frac{\pi}{2} * \sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} \right) - 1 \right] \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde:

- e: es la distancia de la excentricidad igual a 24 [mm]

$$y_{max} = 24[mm][\sec 0.0719 - 1]$$

$$y_{max} = 0.0621[mm]$$

Finalmente encontramos el esfuerzo máximo permisible en la columna con la siguiente expresión:

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} * \left[1 + \frac{(y_{max}+e)*c}{r^2} \right] \quad \text{Ecuación 37}^6$$

Donde:

- r: es la relación de esbeltez de la columna
- c: la distancia al centro de masa
- A: el área transversal de la columna

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{Ecuación 38}$$

$$r = \sqrt{\frac{d_o^2}{16}}$$

$$r^2 = 156.25 [mm^2]$$

$$A = \frac{\pi*d_o^2}{4} = 1963.5 [mm^2] \quad \text{Ecuación 39}$$

⁶ (Beer, Russell Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2009)

$$\sigma_{max} = \frac{10993.7[N]}{1963.5 [mm^2]} * \left[1 + \frac{(0.0621[mm] + 24[mm]) * 25[mm]}{156.25 [mm^2]}\right]$$

$$\sigma_{max} = 27.15 [MPa]$$

Los valores de esfuerzo y deflexión máxima en la columna están dentro del rango permitido.

3.1.7. DISEÑO DEL BRAZO DE IMPRESIÓN

Para el diseño del brazo de impresión se debe considerar la longitud del eje del husillo de bolas, y el peso de los componentes que conformarán el brazo de impresión estudiados en la sección 3.1.2.

De tal manera se ha planteado el diseño del brazo de impresión conformado por una plancha de acero A 36 rectangular de 850 [mm] de largo por 160 [mm] de ancho y de 5 [mm] de espesor, que soporta todos los componentes del brazo de impresión, como son el husillo de bolas donde esta acoplado el pistón que sostiene la rasqueta y el motor paso a paso.

Para empezar se debe comprobar que dicha plancha considerada como viga en voladizo, no falle por el esfuerzo generado por las cargas que soporta.

Por lo tanto es necesario hallar el momento flector máximo al que estará sometida dicha viga, por lo que se procede a realizar un análisis por fuerza cortante y momento flector como se describe en el siguiente programa desarrollado en Matlab.

%Programa para el cálculo del momento máximo en el soporte del brazo de impresión.

%Ingreso de datos

```

L=0.950; %Longitud del soporte [m]
Wmt=21.56; %Peso del motor [N]
R6=21.53; %Reacción R6 [N]
R7=18.46; %Reacción R7 [N]
R=Wmt+R6+R7+500; %Reacción Total [N]
d5=0.100; %Distancia del centro de gravedad al motor
d6=0.110; %Distancia del motor a R6
d7=0.650; %Distancia de R6 a R7
i=1;
MA=R*(d5+d6+d7);
MB=(R-Wmt)*(d5+d6);
M1 (1:950)=0;
V1 (1:950)=0;
x= (0.001:L/950:L);
for (d=0:0.001:0.950)
if(d<=d5)
M1(i)=R*(d-(d5+d6+d7));
V1(i)=R;
i=i+1;
end
if(d>d5)&&(d<=(d5+d6))
M1(i)=(R-Wmt)*(d-(d5+d6+d7));
V1(i)=R-Wmt;
i=i+1;
end
if (d>(d5+d6))&&(d<=(d5+d6+d7))
M1(i)=(R-Wmt-R6)*(d-(d5+d6+d7));
V1(i)=R-Wmt-R6;
i=i+1;
end
if (d>(d5+d6+d7))
M1(i)=0;

```

```

V1(i)=0;
end
end
figure(1);plot(x,V1);
xlabel('X[m]');
ylabel('V[N]');
title('Fuerzas Cortantes en el eje');
grid on;
figure(2);plot(x,M1);
xlabel('X[m]');
ylabel('M[Nm]');
title('Momento flector en el eje');
grid on;

```

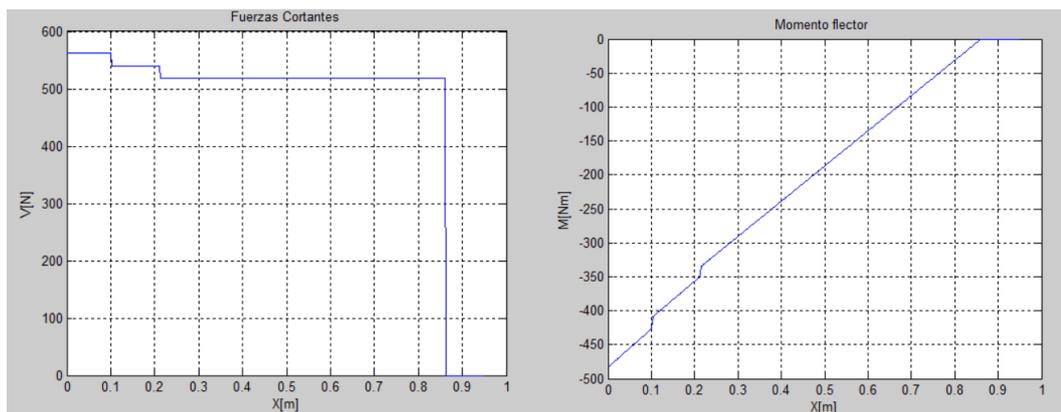


Figura 66 Gráficas de los Diagramas de fuerza cortante y de momento flector en el soporte del brazo de impresión.

Donde se puede observar que el momento flector máximo generado en el soporte es en su extremo izquierdo, cuyo valor es igual a -482.93 [Nm], ver figura 66.

$$\sigma_5 = M5_{max}/S_5$$

Ecuación 40

En donde S_5 es la sección transversal del soporte de la plancha que soporta el brazo de impresión tipo viga de forma rectangular, que se calcula a continuación.

$$S_5 = \frac{b_{s5} * (h_{s5})^2}{6} \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde b_{s5} es la base del área transversal igual a 0.160 [m] y h_{s5} es la altura del área transversal igual a 0.015 [m].

De esta manera se tiene:

$$S_5 = \frac{0.160 [m] * 0.015^2 [m^2]}{6}$$

$$S_5 = 6 * 10^{-6} [m^3]$$

$$\sigma_5 = \frac{482.93 [Nm]}{6 * 10^{-6} [m^3]}$$

$$\sigma_5 = 80.48 [MPa]$$

Lo que se comprueba que el soporte del brazo de impresión no fallará ya que estará diseñado con un factor de seguridad de aproximadamente 3.

3.1.8. SELECCIÓN DEL RODAMIENTO

Para la selección del rodamiento es importante conocer las dimensiones del eje y la carga que va a soportar. Por lo tanto el diámetro interno del rodamiento debe ser de mayor tamaño que el diámetro externo del eje de engrane que es de 38 [mm]. Con este valor se selecciona de los catálogos de la SKF el rodamiento para el proyecto.

Dentro del catálogo encontramos que el valor superior de diámetro interno más cercano a los 38 [mm] es el de 40 [mm], con un diámetro externo de 90 [mm].

Del rodamiento se debe encontrar la capacidad de carga dinámica, la cual debe ser menor a la que consta para el tipo de rodamiento. La carga que recibe el rodamiento axialmente es de 2 [KN], y radialmente es de 1.8 [KN]. Por ende, es necesario conocer el valor del factor P que es el factor de carga dinámica equivalente.

Para encontrar el valor de P es necesario ingresar a la aplicación web de SKF para cálculo de rodamientos, donde se ingresa el número del rodamiento, el valor de la carga axial y el valor de la carga radial, donde para el estudio el número del rodamiento será el 6308.

Equivalent dynamic bearing load : 6308	
Input parameters	
Select bearing internal radial clearance	Normal internal radial clearance
Fr Radial load	2 kN
Fa Axial load	1.8 kN
Result	
P Equivalent dynamic bearing load	3.96 kN

Figura 67 Cálculo del valor del factor de carga a la fatiga en el software de la SKF.

Fuente: (SKF Group, 2015)

De esta manera se obtiene que el valor de P es de 3.96 [KN], con lo que procedemos a calcular la capacidad de carga dinámica en función de las horas de servicio que viene dada por la siguiente ecuación:

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60 \cdot n} * \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde:

L_{10h} : Es la vida nominal, en horas de servicio.

n : Es la velocidad de rotación.

C : Es la capacidad de carga dinámica (N)

P : Es la carga dinámica equivalente (N)

p : Exponente de la fórmula de vida

p : 3 para rodamientos de bolas

La vida nominal en horas de servicio es recomendada para cada tipo de máquina, considerando que la máquina serigráfica tiene 12 horas de trabajo, la recomendación es:

$$40000 \leq L_{10h} \leq 50000 \quad \text{Ecuación 43}$$

En este proyecto se va a trabajar con el valor crítico, es decir, con 50000 horas de servicio, y como la velocidad de rotación de los brazos giratorios es 20 [rpm]. Por lo tanto resolviendo C de la Ecuación 44, obtenemos lo siguiente:

$$C = \sqrt[3]{\frac{L_{10h} * 60 * n}{1000000}} * P \quad \text{Ecuación 44}^7$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{50000 * 60 * 20}{1000000}} * 3.96 [KN]$$

$$C = 15.5 [KN]$$

Con la capacidad de carga dinámica calculada y el diámetro interno requerido para el rodamiento, se selecciona el rodamiento en base al catálogo SKF, el 6308 que tiene una capacidad de carga dinámica de 42.3 [kN], obteniendo un factor de seguridad de 2.73.

Las especificaciones técnicas del rodamiento 6308 se pueden apreciar en la tabla 17.

Tabla 17
Especificaciones técnicas del rodamiento 6308

⁷ (Norton, 2011)

Característica	Símbolo	Valor	Magnitud
Capacidad de carga dinámica	C	42.3	kN
Capacidad de carga estática	C ₀	24	kN
Carga de fatiga límite	P _u	1	kN
Velocidad de referencia		17000	r/min
Límite de velocidad		11000	r/min

Fuente: (SKF Group, 2015)

3.1.9. DISEÑO DEL HUSILLO DE BOLAS

Para el diseño del husillo de bolas empleado en el proyecto, que tiene la función de transportar y posicionar con precisión el racle de impresión. Se lo ha diseñado de tal manera que cumpla satisfactoriamente el ciclo de trabajo que se representa a continuación, ver tabla 18.

Tabla 18
Ciclo de Carga de Husillo de Bolas

FASE	CARGA
FASE 1	Carga estable de 600 [N], durante un desplazamiento de 600 [mm], con una velocidad lineal de 60 [mm/s], duración de la fase es de 10 [s].
FASE 2	La tuerca retorna a la posición inicial, con una carga estable de 400 [N] en un desplazamiento de 600 [mm], la duración de la fase es de 10 [s].
PAUSA	Luego un periodo de pausa de 15 [s] con carga de 400 [N] y sin desplazamiento.
CICLO DE OPERACIÓN	El ciclo de operación es de 12 horas al día, 6 días a la semana, 50 semanas por año.

Fuente: (Propia)

En la tabla 18, se puede apreciar que la máxima carga que soportará el husillo de bolas es de 600 [KN], ya que corresponde a la suma de todas cargas ejercidas sobre la tuerca multiplicadas por un factor de seguridad de 3.5.

A continuación se calculan los parámetros de diseño para el husillo de bolas del tipo PND 16 x 5. Descrito como tuerca con pre-carga interna, 2 x 3 circuitos de recirculación, capacidad de carga dinámica $C_a = 5.5 [KN]$ y capacidad de carga estática $C_{0a} = 7.1 [KN]$, ver tabla 19.

Tabla 19
Catálogo de Husillos precargados PND, norma DIN 69051

Diámetro nominal	Paso	Tuerca		Número de circuitos de bolas	Par de precarga medio T_{pr}	Rigidez R_n	Inercia	Grasa	Peso	Eje del husillo			Designación
		Capacidad de carga básica dinámica C_a	estática C_{0a}							Masa	Inercia	Grasa	
d_0	P_h	kN			Nm	$N/\mu m$	$kgmm^2$	cm^3	kg	kg/m	$kgmm^2/m$	cm^3/m	
16	10	5,5	7,1	2x2	0,08	147	46	1	0,19	1,3	33	2,1	PND 16x5 R
		10,7	17,2	2x2x1,8	0,15	263	56	2,7	0,28	1,21	30,7	1,9	PND 16x10 R ¹⁾
20	5	8	11,9	2x2	0,14	248	91	1,3	0,26	2	85	2,7	PND 20x5 R
25	5	12,7	22,7	2x3	0,28	436	405	2	0,4	3,3	224	3,4	PND 25x5 R
	10	13,3	19,5	2x2	0,3	264	245	4,5	0,53	3,2	255	3,2	PND 25x10 R
32	5	19	41,3	2x4	0,52	734	453	3,2	0,715	5,6	641	3,2	PND 32x5 R
	10	21,9	39	2x3	0,61	490	490	7,6	0,81	5,6	639	4,1	PND 32x10 R
40	5	25,6	65,6	2x5	0,71	968	1 110	4,8	1,3	9	1 639	5,5	PND 40x5 R/L ²⁾
	10	52,2	99,3	2x4	1,47	793	1 290	15,5	1,8	8,4	1 437	4,9	PND 40x10 R
50	10	71,3	157,3	2x5	2,47	1 222	2 940	27,5	2,6	13,6	3 736	7,9	PND 50x10 R
63	10	81,5	206,9	2x5	3,46	1 448	5 290	26,8	3,2	22	9 913	7,9	PND 63x10 R

Fuente: (Grupo SKF, 2013)

El eje del husillo está montado horizontalmente por dos rodamientos de apoyo del tipo PLBU 16 y BUF 16 (VER ANEXO 2).

- **Cálculo de la carga media equivalente**

La máxima carga del ciclo de operación no debe crear una excesiva condición de carga que pueda disminuir la vida útil del husillo de bolas, y se la calcula a continuación.

Como la carga máxima aplicada = 600 [N] y el 60% de $C_a = 3.3$ [KN], por lo tanto no se disminuye la vida útil del husillo por la carga máxima aplicada.

Para el cálculo de la carga media equivalente consideramos cada carga con su respectivo desplazamiento.

$$F_1 = 600 \text{ [N]} \quad \text{sobre } L_1 = 600 \text{ [mm]}$$

$$F_2 = 400 \text{ [N]} \quad \text{sobre } L_2 = 600 \text{ [mm]}$$

$$F_m = \sqrt[3]{\frac{F_1^3 * L_1 + F_2^3 * L_2}{L_1 + L_2}} \quad \text{Ecuación 45}$$

Reemplazando los respectivos valores en la ecuación 45, tenemos:

$$F_m = \sqrt[3]{\frac{(600 \text{ [N]})^3 * 600 \text{ [mm]} + (400 \text{ [N]})^3 * 600 \text{ [mm]}}{600 \text{ [mm]} + 600 \text{ [mm]}}$$

$$F_m = 519.25 \text{ [N]}$$

- **Cálculo de la vida nominal L_{10}**

$$L_{10} = \left(\frac{C_a}{F_m}\right)^3 \quad \text{Ecuación 46}$$

$$L_{10} = \left(\frac{5500}{519.25}\right)^3 = 1187 \text{ [millones de rev]}$$

Numero de revoluciones de la tuerca para un ciclo completo se encuentra a partir de la ecuación 47.

$$N_{RT} = \frac{2*600}{5} = 240 \text{ [rev]} \quad \text{Ecuación 47}$$

Donde para encontrar los ciclos completos se utiliza la ecuación 48.

$$C_{cmp} = \frac{1187 \cdot 10^6}{240} = 4.94 \text{ [millones de ciclos completos]} \quad \text{Ecuación 48}$$

Un ciclo completo tarda $(10+10+15)=35$ [s]

Por lo que la vida nominal es:

$$V_n = \frac{4.94 \cdot 10^6 \cdot 35}{3600 \cdot 12 \cdot 6 \cdot 50} = 13 \text{ años con 90\% confiabilidad} \quad \text{Ecuación 49}$$

- **Velocidad crítica del eje del husillo**

La velocidad crítica debe ser verificada, especialmente cuando el desplazamiento de la tuerca es grande comparado con el diámetro del husillo.

La longitud roscada del eje es calculada considerando el desplazamiento total de la tuerca (600 [mm]), más la longitud de la tuerca (48 [mm]), más la longitud extra sin roscar en los dos extremos del eje que es igual a dos pasos ($2 \cdot 2 \cdot 5 = 20$ [mm]). Entonces la longitud roscada total es 668 [mm].

El conjunto de husillo de bolas es montado horizontalmente. El acabado de los finales del eje es 2A para el rodamiento de soporte PLBU 16, y 4A para el rodamiento de soporte BUF 16. La combinación de acabado del eje 2A + 4A es llamada HA en el código de pedido, ver figura 68.

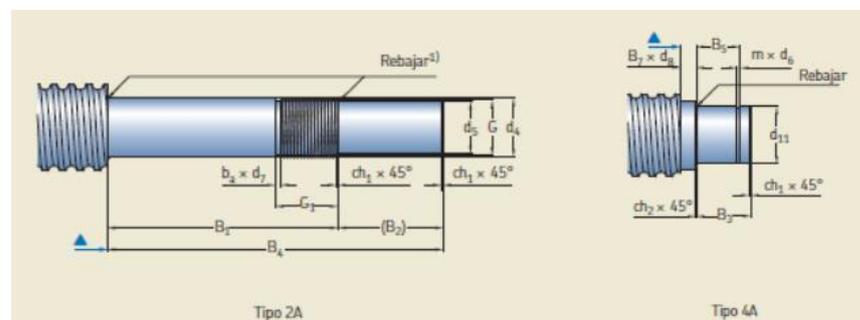


Figura 68 Extremo mecanizado estándar para diámetro nominal de Eje ≥ 16 mm para PND Tipo 2A y Tipo 4A

Fuente: (Grupo SKF, 2013)

Para el acabado de eje tipo 2A, según el diámetro nominal $d_0 = 16$ [mm], la posición central axial de los rodamientos es calculada según la ecuación 50.

$$\frac{B_1 - G_1}{2} \quad \text{Ecuación 50}$$

De donde B_1 y G_1 son valores correspondientes al husillo de 16 [mm]. (VER ANEXO 3).

$$\frac{53 - 17}{2} = 18 \text{ [mm]}$$

Para el acabado de eje tipo 4 A, la posición central axial de los rodamientos es calculada mediante la ecuación 51.

$$B_7 + \left(\frac{B_5 - m}{2} \right) \quad \text{Ecuación 51}$$

De donde B_7 , B_5 y m , son valores correspondiente al husillo de diámetro nominal de 16 [mm]. (VER ANEXO 4)

$$2 + \left(\frac{(10 - 1.1)}{2} \right) = 6.45 \text{ [mm]}$$

Por lo que la longitud libre entre los dos rodamientos de soporte será:

$$l = 668 + 18 + 6.45 = 692.45 \text{ [mm]} \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde para encontrar la velocidad crítica se utiliza la ecuación 53.

$$n_{cr} = 49 * 10^6 * \frac{f_1 * d_2}{l^2} \quad \text{Ecuación 53}$$

f_1 Es el factor de corrección de montaje, de valor 3.8 para la aplicación.

d_2 es el diámetro raíz del eje roscado del husillo 16 x 5, ver tabla 20.

Tabla 20
Diámetro raíz de ejes roscado de husillos de bola

Dimensiones	d_2	d_3
	mm	
6x2	4,7	
8x2,5	6,3	
10x2	8,3	
10x3	7,8	
10x4	7,4	
12x2	9,9	
12x4	9,4	
12x5	9,3	
12,7x12,7	10,2	
14x4	11,9	
16x2	14,3	12
16x5	12,7	9
16x10	12,6	9
20x5	16,7	14

Fuente: (Grupo SKF, 2013)

De donde reemplazando los valores en la ecuación 53, tenemos:

$$n_{cr} = 49 * 10^6 * \frac{3.8 * 12.7[mm]}{(692.45 [mm])^2}$$

$$n_{cr} = 4931 [rpm]$$

Por tal motivo el husillo no podrá girar a más de 4931 rpm para el diseño del funcionamiento, por lo que se adecua una velocidad máxima de

$$n = 1000 [rpm].$$

De esta forma se debe verificar que la velocidad límite no exceda el valor máximo permitido para husillos PND, mediante la ecuación 54.

$$n * d_0 < 50000$$

Ecuación 54

$$1000[rpm] * 16[mm] < 50000$$

$$16000 < 50000$$

- **Par de entrada**

Para conocer el par de entrada que necesita la aplicación del husillo, se debe calcular la eficiencia practica mediante la ecuación 55.

$$\eta_p = 0.9 * \eta$$

Ecuación 55

De donde η se calcula mediante la ecuación 56.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi * d_0}{P_h} * \mu}$$

Ecuación 56

P_h es el paso del husillo igual a 5 [mm], y μ igual a 0.006 para husillos PND.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi * 16 [mm]}{5 [mm]} * 0.006} = 0.9431$$

Reemplazando los valores en la ecuación 55, tenemos:

$$\eta_p = 0.9 * 0.9431 = 0.848$$

Donde para obtener el par de entrada se utiliza la ecuación 57.

$$T = \frac{F * P_h}{2000 * \pi * \eta_p}$$

Ecuación 57

Donde F es la carga máxima que para esta ocasión es 600 [N].

$$T = \frac{600[N] * 5 [mm]}{2000 * \pi * 0.848} = 0.56 [Nm]$$

De esta manera se selecciona un motor paso a paso con torque máximo de 3 [Nm], superior al mínimo requerido par de entrada para la aplicación, con lo que el motor no requerirá mucho trabajo para cumplir con su propósito.

3.1.10. SELECCIÓN DEL ACTUADOR LINEAL NEUMÁTICO

Para el accionamiento del racle de impresión se ha visto la necesidad de seleccionar el actuador neumático más adecuado para realizar el movimiento lineal por medio de un cilindro de émbolo.

Los cilindros neumáticos independientemente de su forma constructiva, representan los actuadores más comunes que se utilizan en los circuitos neumáticos. Existen dos tipos fundamentales:

- **Cilindros de simple efecto**

Un cilindro de simple efecto desarrolla un trabajo sólo en un sentido. El émbolo se hace retornar por medio de un resorte interno o por algún otro medio externo como cargas, movimientos mecánicos, etc. Puede ser de tipo normalmente dentro o normalmente fuera.

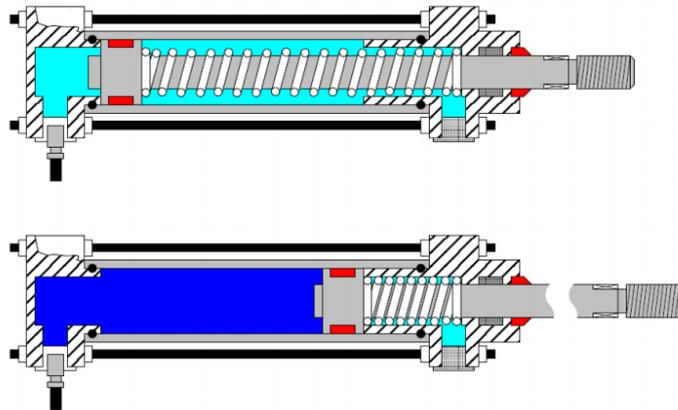


Figura 69 Cilindro de simple efecto tipo normalmente dentro

Fuente: (Escalera & Rodríguez, 2010)

- **Cilindros de doble efecto**

Los cilindros de doble efecto son aquellos que realizan tanto su carrera de avance como el de retroceso por acción del aire comprimido. Su denominación se debe a que emplean las dos caras del émbolo, por lo que estos componentes sí que pueden realizar trabajo en ambos sentidos.

Sus componentes internos son prácticamente iguales a los de simple efecto, con pequeñas variaciones en su construcción. Algunas de las más notables las encontramos en la culata anterior, que ahora ha de tener un orificio roscado para poder realizar la inyección de aire comprimido.

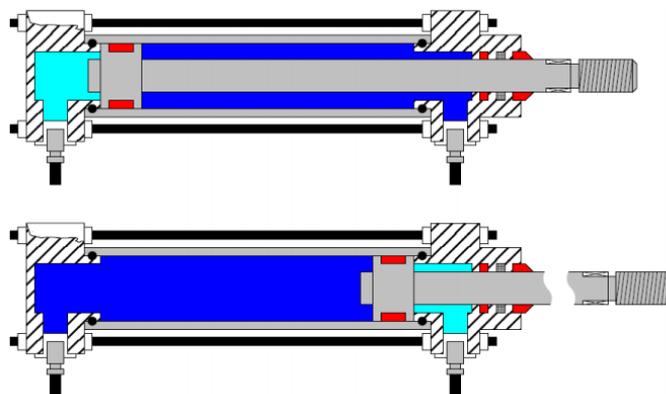


Figura 70 Cilindro de doble efecto

Fuente: (Escalera & Rodríguez, 2010)

De acuerdo a lo estipulado se seleccionará el cilindro neumático más adecuado para emplearlo en el proyecto mediante una matriz de selección, que se muestra a continuación.

Criterios a evaluar:

Los criterios a evaluar en la matriz de valoración tendrán valores diferentes, los cuales sumados son 100 puntos, definiendo de esta manera que el tipo de cilindro neumático con más alto puntaje será el seleccionado. Los criterios a ser evaluados son:

- **Consumo de aire:** El consumo de aire es un parámetro importante a la hora de seleccionar un cilindro neumático puesto que es directamente proporcional al consumo de energía eléctrica. A este criterio se asignó un valor de 20 puntos siendo el valor más alto para el cilindro neumático que exija menos consumo de aire para su operación.
- **Fuerza de accionamiento:** Es importante que la fuerza de accionamiento no pierda su magnitud a la hora de presionar el racle sobre la camiseta, debido a que esta fuerza debe ser constante en todo el proceso para no obtener imperfecciones en el relieve de la tinta impresa. A este criterio se asignó un valor de 20 puntos siendo el valor más alto para el tipo de cilindro neumático cuya fuerza de accionamiento sea constante y de gran magnitud.
- **Carrera del vástago:** Para la aplicación del racle de impresión se ha de necesitar un cilindro neumático con una carrera extensa, mayor a los 40 [mm] debido al diseño de la máquina, para que el racle no llegue a chocar con los marcos serigráficos a la hora que giren. A este criterio se asignó un valor de 25 puntos siendo el valor más alto para el tipo de cilindro neumático que cuente con carreras de vástago extensos.

- **Posicionamiento:** Es de gran importancia que el vástago que transporta el racle mantenga su posicionamiento en toda la impresión. A este criterio se le asignó un valor de 20 puntos siendo el valor más alto para el tipo de cilindro neumático que asegure el posicionamiento del vástago en toda la impresión.
- **Mantenimiento:** El mantenimiento sobre el cilindro neumático es otro criterio importante a evaluar, ya que no debe consistir de operaciones costosas a la hora de que el cilindro haya tenido un imperfecto. A este criterio se le asignó un valor de 15 puntos siendo el valor más bajo aquel tipo de cilindro neumático que conlleve a reemplazar más piezas, y realizar más operaciones que generen gastos económicos a la hora de dar mantenimiento al dispositivo.

Tabla 21
Criterios a evaluar para la selección del tipo de cilindro neumático.

No	Criterio a Evaluar	Símbolo	Valoración
1	Consumo de aire	CA	20
2	Fuerza de accionamiento	F	20
3	Carrera del vástago	CV	25
4	Posicionamiento	P	20
5	Mantenimiento	M	15
		Total:	100

Una vez establecidos los criterios a evaluar con sus respectivas valoraciones se procede a realizar la tabla de evaluación de los tipos de cilindros neumáticos, para seleccionar el de mejor puntaje.

Tabla 22
Criterios evaluados para la selección de la válvula neumática

SISTEMA	ÍTEM	Tipos	CRITERIOS					TOTAL
			CA	F	CV	P	M	
Actuador lineal neumático	Cilindro neumático	Cilindro Simple Efecto	20	10	10	10	10	60
		Cilindro Doble Efecto	10	20	25	20	15	90

El tipo de cilindro neumático seleccionado es el de doble efecto debido a que a pesar de ser el que más aire consume, nos permite contar con una fuerza de accionamiento elevada y constante. Los cilindros de doble efecto siempre contienen aire en una de sus cámaras, por lo que asegura el posicionamiento. Además la carrera del vástago excede notablemente la del cilindro de simple efecto cuyo criterio fue el de mayor puntaje en la selección.

De esta manera se ha seleccionado el cilindro neumático de doble efecto y simple vástago de la marca Uxcell, que cuenta con un diámetro de émbolo de 25 [mm] y un vástago con diámetro de 8.5 [mm] con una carrera de 50 [mm]. Tiene un tamaño total de 185 x 30 [mm] suficiente para asegurar y transportar la rasqueta, además de estar conformado de un material aleado, soporta una presión máxima de 0.7 [MPa].



Figura 71 Cilindro neumático de doble efecto Uxcell MAL 25 x 50

Fuente: (Amazon, Uxcell-Double-Action-Pneumatic-Cylinder, 2016)

Circuito neumático:

El diseño del circuito neumático debe satisfacer todos los requerimientos para que se pueda controlar el accionamiento del cilindro de doble efecto por medio del controlador.

Para satisfacer dicha necesidad la válvula a utilizar debe ser estrictamente de 2 posiciones y al menos de 5 vías, además que su mando sea accionado por solenoide y de preferencia cuente con retorno por muelle.

En la figura 72, se puede apreciar el diagrama de espacio – fase con su respectiva señal de mando, del cilindro neumático para un ciclo de impresión.

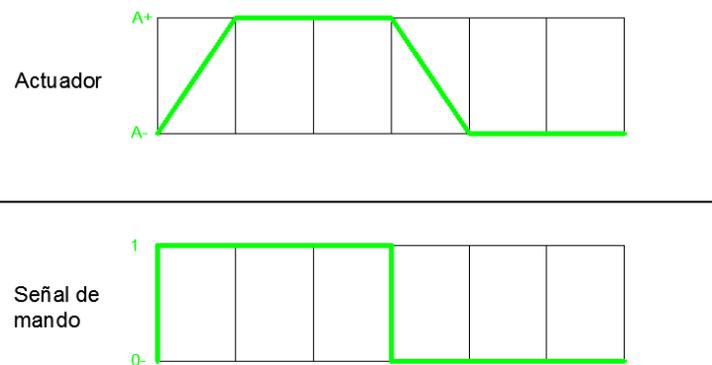


Figura 72 Diagrama de espacio – fase del cilindro neumático

Fuente: (Propia)

En la figura 73, se puede apreciar el diagrama de conexión del cilindro de doble efecto con una válvula de 2 posiciones y 5 vías, por mando de solenoide y retorno por muelle necesario para cumplir con el diagrama de espacio – fase anterior.

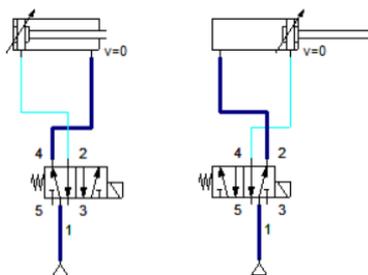


Figura 73 Circuito neumático del brazo de impresión

Fuente: (Propia)

Cálculo de presión:

Para conocer la presión manométrica que requerirá proporcionar el compresor al cilindro para ejercer una fuerza de 100 [N], lo suficiente para realizar la impresión del racle sobre la camiseta, realizamos el siguiente cálculo:

$$P_{abs} = \frac{F}{A_e} \quad \text{Ecuación 58}$$

Donde:

- F : es la fuerza requerida para la impresión
- A_e : es el área del émbolo del cilindro neumático
- P_{abs} : es la presión absoluta

$$A_e = \pi * r_e^2 \quad \text{Ecuación 59}$$

- r_e : es el radio del embolo del cilindro neumático

$$A_e = \pi * (0.0125[m])^2$$

$$A_e = 4.9 * 10^{-4}[m^2]$$

$$P_{abs} = \frac{100 [N]}{4.9 * 10^{-4}[m^2]} = 204081.63 [Pa] = 2.04[Bar]$$

Por lo tanto para encontrar la presión manométrica que deberá darnos el compresor, utilizamos la siguiente expresión.

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm} \quad \text{Ecuación 60}$$

$$P_{man} = 2.04 [Bar] - 1[Bar]$$

$$P_{man} = 1.04 [Bar]$$

Selección del compresor:

Para conocer el gasto de energía y seleccionar el compresor más adecuado es importante conocer el consumo de aire de la instalación. El cálculo de dicho consumo debe estar referido a condiciones normales de funcionamiento (presión atmosférica de 1 bar, temperatura de 20 grados centígrados y humedad relativa de 65%).

Se debe conocer el volumen de la cámara posterior y de la cámara anterior del cilindro neumático de doble efecto seleccionado, con las siguientes expresiones:

$$V_{\text{cámara posterior}} = \frac{\pi * \phi_e^2}{4} * e \quad \text{Ecuación 61}$$

$$V_{\text{cámara anterior}} = \frac{\pi * (\phi_e^2 - \phi_v^2)}{4} * e \quad \text{Ecuación 62}$$

Donde:

- ϕ_e = Diámetro del émbolo (25 [mm])
- ϕ_v = Diámetro del vástago

$$V_{\text{cámara posterior}} = \frac{\pi * (0.025[m])^2}{4} * 0.05[m] = 2.45 * 10^{-5}[m^3] = 0.0245[lt]$$

$$\begin{aligned} V_{\text{cámara anterior}} &= \frac{\pi * (0.025[m])^2 - (0.0085^2)}{4} * 0.05[m] = 2.17 * 10^{-5}[m^3] \\ &= 0.0217[lt] \end{aligned}$$

Sumando los dos volúmenes, obtenemos el volumen total de ambas cámaras:

$$V_{\text{cil}} = V_{\text{cámara posterior}} + V_{\text{cámara anterior}} = 0.0462 [lt] \quad \text{Ecuación 63}$$

Puesto que el consumo debe estar referido a condiciones normales de funcionamiento, habrá que aplicar la ley de Boyle-Mariotte, suponiendo por tanto que la temperatura en el interior y el exterior del cilindro es aproximadamente la misma.

$$P_{abs} * V_{cil} = P_{atm} * V_{aire} \quad \text{Ecuación 64}$$

El volumen de aire del consumo se obtiene despejando de la expresión anterior:

$$V_{aire} = \frac{P_{abs} * V_{cil}}{P_{atm}} \quad \text{Ecuación 65}$$

$$V_{aire} = \frac{2.04 [Bar] * 0.0462 [lt]}{1 [Bar]}$$

$$V_{aire} = 0.094 [lt]$$

Finalmente, el consumo de aire (C), suponiendo que la máquina realiza n ciclos por minutos será:

$$C = V_{aire} * n \quad \text{Ecuación 66}$$

$$C = 0.094 [lt] * 10 \left[\frac{\text{ciclos}}{\text{min}} \right]$$

$$C = 0.942 \left[\frac{lt}{min} \right] \approx 1 \left[\frac{lt}{min} \right]$$

De esta manera se ha seleccionado el compresor Shimaha Modelo W-2006A de ¾ HP, cuyo caudal es de 150 Litros por minuto, lo suficientemente abastecedor para nuestra instalación con la capacidad de añadir más dispositivos neumáticos.



Figura 74 Compresor neumático Shimaha Modelo W-2006 A

Fuente: (Mercado Libre, 2016)

Tabla 23
Características técnicas del Compresor Shimaha W-2006 A

Potencia	¾ [HP]
Caudal	150 [L/min]
Tanque	61 [lts]
Voltaje	110 [V]
Frecuencia	60 [Hz]
Peso	16 [Kg]
Presión	1251 [Lb]
Rev.	3400 [rpm]

3.2. DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

3.2.1. SELECCIÓN DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

3.2.1.1. SELECCIÓN DEL MOTOR PASO A PASO

Para la selección del motor paso a paso se deben considerar las ventajas y desventajas que poseen este tipo de motores.

– Ventajas:

- Gran capacidad para asegurar un posicionamiento simple y exacto.
- El control se realiza en bucle abierto sin necesidad de sensores de realimentación.

- Pueden girar de forma continua, con velocidad variable.
 - Motores muy ligeros, fiables y fáciles de controlar.
- Desventajas:
- Funcionamiento a bajas velocidades no es suave (discretizado por los pasos).
 - Existe el riesgo de pérdida de alguna posición por trabajar en bucle abierto.
 - Tienen a sobrecalentarse trabajando a velocidades elevadas.
 - Presentan un límite en el tamaño que pueden alcanzar.

Una vez analizadas las ventajas y desventajas que presentan los motores paso a paso se considera seleccionar el motor Nema 23HS45-4204S, siendo uno de los motores paso a paso de torque 3 [Nm] más fácil de manipular, de acuerdo a los parámetros requeridos (ver sección 3.1.3).



Figura 75 Motor paso a paso Nema 23 23HS45-4204S

Fuente: (OMC Stepperonline, 2016)

Para solventar la desventaja del riesgo de pérdida de alguna posición por el motor paso a paso seleccionado, se ha considerado la utilización de un encoder incremental que mida el desplazamiento angular de la flecha del motor y con ello contar con un control retroalimentado.

La principal razón de haber seleccionado un motor paso a paso que un servomotor es por el excesivo costo que tienen los servos con respecto a otros motores, cuyas aplicaciones son para tareas más complejas.

Tabla 24
Características del motor 23HS45-4204S

Especificación Eléctrica					
Paso de ángulo	Torque máximo	Corriente	Voltaje	Inductancia	
1.8°	3.0 Nm	4.2 A	24- 48 V	3.8mH	
Especificaciones Físicas					
Tamaño Marco	de Longitud del cuerpo	del Diámetro del eje	Longitud del eje	Peso	
57 x 57 mm	113 mm	10 mm	24 mm	1.8 kg	

Fuente: (OMC Stepperonline, 2016)

Como se puede observar en las especificaciones, se tiene un torque menor al requerido, por lo que se tiene que construir un sistema de reducción de engranes que permita aumentar dicho torque, ese diseño está descrito en la sección 3.1.3.1.

3.2.1.2. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL STEPPER DRIVER

Un stepper driver es un dispositivo que recibe una señal de mando de un sistema de control, amplifica la señal, y transmite corriente eléctrica a un motor paso a paso con el fin de producir el movimiento proporcional a la señal de mando. Esta señal de mando puede ser el número de pasos a realizar y la dirección de rotación.

Para la selección de los stepper driver es necesario conocer que motor a pasos se va a implementar en el proyecto. Para motores a pasos NEMA 23 la tarjeta Toshiba TB6560 AHQ de 3.5 amperios, brinda las mejores características en un driver para potenciar y controlar con mayor precisión.

Características del Toshiba TB6560 AHQ de 1 fase 3.5 A:

- Fácil de operar.

- Cuenta con un disipador de calor.
- La señal de entrada es de alta velocidad con acoplamiento aislado, para garantizar la no pérdida de pasos.
- Cuenta con un modelo de atenuación para todo tipo de motor paso a paso y puede ser bloqueado cuando existe ruido.
- Tamaño ultra pequeño.
- Voltaje: DC 12 V – 24 V
- Corriente Máxima: 3.5 A
- Corriente ajustable: 0.5 A, 1 A, 1.5 A, 1.8 A, 2 A, 2.5 A, 3.5 A.
- Modo de excitación ajustable manualmente.
- Configuración de torque ajustable.
- Cuenta con resistencias internas pull down de 100 [kΩ]



Figura 76 Toshiba TB6560 AHQ

Fuente: (Amazon, SainSmart-Router-Single-Stepper-Stepping, 2015)

El resto de las características técnicas del driver TB6560 AHQ se pueden observar en el ANEXO 5. El sistema de comunicación entre el Toshiba TB6560 AHQ y el controlador será mediante señales de pulsos rectangulares PWM de bajo amperaje, por lo que se conectan los pines del controlador directo al driver sin añadir otro dispositivo en medio, ya que el driver cuenta con resistencias internas.

3.2.1.3. SELECCIÓN DE LA VÁLVULA SOLENOIDE

Para el accionamiento del cilindro de doble efecto se debe escoger la válvula neumática más adecuada para la aplicación, por lo que los requerimientos mínimos que debe cumplir son los siguientes:

- Ser una válvula de 2 posiciones con 5 vías.
- Mando por solenoide.
- Retorno por muelle.
- Presión máx. alrededor de los 0.7 [MPa].
- Robusto
- Compacto
- De fácil montaje
- De fácil adquisición
- Económico

Las 3 válvulas neumáticas preseleccionadas que cuentan con varios de los requerimientos planteados, entre el más importante su fácil adquisición, son las siguientes:

- Válvula Uxcell 4V310-10
- Válvula Uxcell 4V110-06
- Válvula USS- PSV00034

Tabla 25
Matriz morfológica de la selección de la válvula neumática

SISTEMA CONTROL DEL ACCIONAMIENTO DEL CILINDRO NEUMATICO			
ÍTEM:			
Válvula neumática	Uxcell 4V310-10	Uxcell 4V110-06	USS – PSV00034
Gráfico			
Ventajas	Bajo costo	Robusto	Baja potencia
	Alimentación por toma corriente	Cable de instalación adaptado	Tamaño compacto
	Soporta presión de 0.8MPa	Soporta presión de 1.2MPa	Soporta presión de 1.2MPa
	De 2 posiciones y 5 vías	De 2 posiciones y 5 vías	De 2 posiciones y 5 vías
Desventajas	Menor robustez	Requiere Fuente de 12V	Requiere Fuente de 12V
	Requiere Cableado	Alto Costo	Requiere Cableado
		Disponibilidad baja	Alto Costo

Criterios a evaluar:

Los criterios a evaluar en la matriz de valoración tendrán valores diferentes, los cuales sumados son 100 puntos, definiendo de esta manera que la válvula con más alto puntaje será la que mejor cumple con los requisitos. Los criterios a ser evaluados son:

- **Alimentación:** Es importante que para suministrar energía al dispositivo, no se requiera adquirir una fuente de poder especial. A este criterio se asignó un valor de 25 puntos siendo el valor más alto para la válvula que requiere una alimentación por toma corriente, y el menor puntaje aquellas que necesiten una fuente de poder adicional.
- **Montaje:** Es necesario que para la colocación de la válvula, esta sea fácil de montar en la máquina. Este criterio tiene mucho que ver con la

forma y dimensiones de la válvula. Se asignó un valor de 25 puntos, siendo el valor más alto cuando el sensor sea el más fácil de montar.

- **Mantenimiento:** Es siempre necesario realizar mantenimientos ya sean estos correctivos o preventivos. A este criterio se asignó un valor de 20 puntos, siendo el valor más bajo aquella válvula que cuente con mayor complejidad en mantenimiento.
- **Costo:** El costo de la adquisición de la válvula debe resultar ser lo más rentable posible, es decir que para la aplicación su compra sea justificada. A este criterio se asignó un valor de 30 puntos, siendo el valor más alto cuando la válvula sea más rentable de adquirir.

Tabla 26
Criterios a evaluar para la selección del sensor de posición angular.

No	Criterio a Evaluar	Símbolo	Valoración
1	Alimentación	A	25
2	Montaje	MO	25
3	Mantenimiento	M	20
4	Costo	C	30
		Total:	100

Una vez establecidos los criterios a evaluar con sus respectivas valoraciones se procede a realizar la tabla de evaluación de las válvulas neumáticas, para seleccionar la de mejor puntaje.

Tabla 27
Criterios evaluados para la selección de la válvula neumática

SISTEMA	ÍTEM	CRITERIOS					TOTAL	
		Tipos		A	MO	M		C
Accionamiento de cilindro de doble efecto	Válvula neumática	Uxcell 4V310-10		25	20	20	30	95
		Uxcell 4V110-06		10	15	20	15	60
		USS – PSV00034		10	20	20	15	65

Como se puede apreciar en la tabla 27, la válvula con mejor puntaje con respecto a los criterios evaluados es la válvula solenoide de aire 4V310-10 de la marca Uxcell cuyas especificaciones técnicas se encuentran en el ANEXO 6.

3.2.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

3.2.2.1. SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE CONTROL

- **CONTROL PROPORCIONAL (P)**

Es la técnica de control donde la señal de accionamiento es proporcional a la señal de error del sistema. Si la señal de error es grande, el valor de la variable regulada es grande y si la señal de error del sistema es pequeña, el valor de la variable regulada es pequeña.

- **CONTROL DE ACCIÓN PROPORCIONAL E INTEGRAL (PI)**

En un controlador integral, la señal de salida del mismo varía en función de la desviación y del tiempo en que se mantiene la misma, o dicho de otra manera, el valor de la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error.

En la práctica no existen controladores que tengan sólo acción integral sino que llevan combinada una acción proporcional. Estas dos acciones se complementan. La primera en actuar es la acción proporcional (instantáneamente) mientras que la integral actúa durante un intervalo de tiempo. Así y por medio de la acción integral se elimina la desviación remanente (proporcional).

- **CONTROL DE ACCIÓN PROPORCIONAL Y DERIVATIVA (PD)**

Control utilizado en sistemas que deben actuar muy rápidamente, puesto que la salida está en continuo cambio. La acción derivativa por sí sola no se utiliza, puesto que para señales lentas, el error producido en la salida en régimen permanente es muy grande y si la señal de mando deja de actuar

durante un tiempo largo la salida tenderá hacia cero y no se realizará ningún control.

- **CONTROL DE ACCIÓN PID**

Aprovecha las características de los tres controladores anteriores, de forma, que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral y, si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa. Tiene la ventaja de tener una respuesta más rápida y una inmediata compensación de la señal de error en el caso de cambios o perturbaciones. Tiene como desventaja que el bucle de regulación es más propenso a oscilar y los ajustes son más difíciles de realizar.

- **CONTROL ON – OFF**

Modo de control en el cual la salida del controlador va de un extremo a otro cuando el valor de la variable controlada se desvía del valor deseado. Este modo de control depende del signo del error, la variación cíclica continua de la variable controlada. Este tipo de controlador no tiene la capacidad para producir un valor exacto en la variable controlada para un valor de referencia.

Tabla 28
Guía de selección de la técnica de control

Control	Cambios de carga	Elimina desviación remanente	Mejor tiempo de respuesta	Aplicaciones
On - Off	Cualquiera	No	Mediano	Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad

CONTINÚA 

Proporcional	Moderados	No	Mediano	Presión, temperatura y nivel donde el offset no es inconveniente
Proporcional Integral	Cualquiera	Sí	Mediano	La mayor parte de aplicaciones, incluyendo el caudal.
Proporcional Derivativo	Rápido	No	Alto	Cuando es necesaria una gran estabilidad con un offset mínimo y sin necesidad de acción integral
PID	Rápido	Sí	Alto	Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables.

Fuente: (Ogata, 2010)

Una vez estudiadas las diferentes técnicas de control clásicas, se ha seleccionado el control proporcional derivativo, ya que es el más adecuado para el sistema de control de posición angular y lineal de los dos motores actuadores.

El controlador PID es la segunda mejor alternativa, y no ha sido seleccionado debido a que no es necesario eliminar la desviación remanente de la salida, ya que es admisible que los posicionamientos tengan un error de ± 5 [mm]. El controlador PID cuenta con una implementación más compleja que del PD, debido al integrador adicional, y requiere más tiempo de procesamiento lo que conlleva a mayores retrasos en posicionamiento, para procesos de impresión de alta velocidad.

3.2.2.2. MODELAMIENTO DEL CONTROLADOR

La función de transferencia del motor es:

$$G(s) = \frac{R*B+K_t}{(L*J)*s^2+(L*B+R*J)*s+(R*B+K_t)} \quad \text{Ecuación 67}^8$$

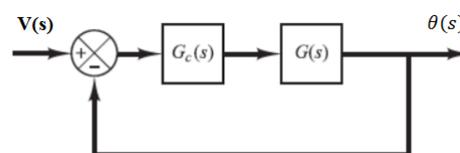


Figura 77 Diagrama de bloques del control del motor

La tabla 29 recoge las características del motor 23HS45-4204S.

Tabla 29
Características del motor 23HS45-4204S

Parámetro	Valor	Unidades
R	0.9	Ω
L	3800	μH
J	800	g cm^2
K	4222	us
B	53	$\text{g cm}^2/\text{us}$

Reemplazando los valores tenemos:

⁸ (Puangdownreong, 2013)

$$G(s) = \frac{17825331}{3040000 * s^2 + 202120 * s + 17825331}$$

La función de transferencia en lazo cerrado para el sistema es:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{5.86}{s^2 + 0.066 * s + 11.72} = \frac{5.86}{(s + 0.033 + j3.42) * (s + 0.0332 - j3.42)}$$

Por lo que los polos en lazo cerrado se localizan en:

$$s = -0.033 \pm j3.42$$

Obtenemos la gráfica del lugar de las raíces.

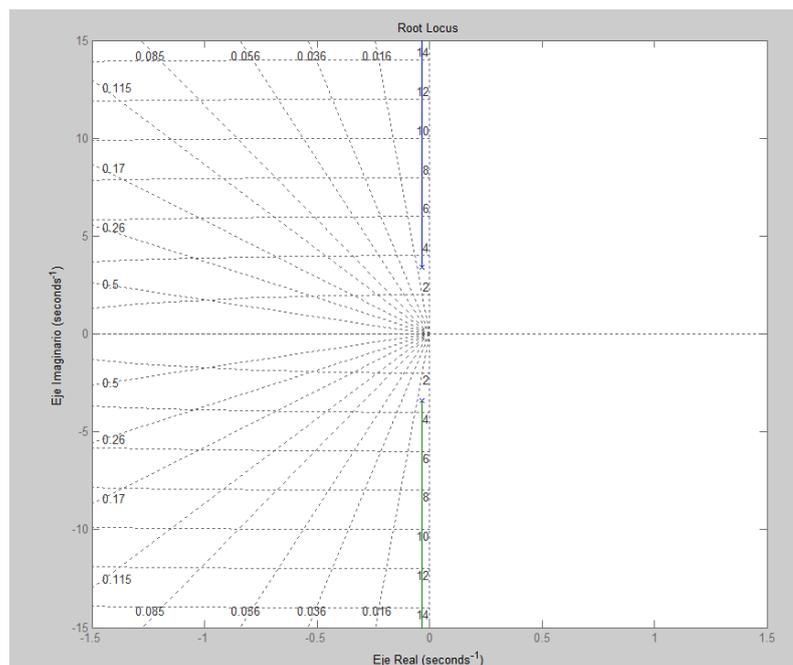


Figura 75 Grafica del lugar de las raíces del sistema

Con los datos obtenidos empezamos a diseñar el controlador PD mediante el método del lugar de las raíces.

El factor de amortiguamiento relativo de los polos en lazo cerrado se encuentra al resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$w_d = 3.42$$

$$w_n * \sqrt{1 - \zeta^2} = 3.42 \quad \text{Ecuación 68}$$

$$\zeta * w_n = 0.033 \quad \text{Ecuación 69}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones tenemos:

$$w_n = 3.42 \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right]$$

$$\zeta = 0.0097$$

Se desea diseñar un controlador PD $G_c(s)$ de forma que los polos en lazo cerrado dominantes tengan el factor de amortiguamiento $\zeta = 1.5$ (sobre amortiguado) y una frecuencia natural de $w_n = 2.40 \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right]$. La localización de los polos en lazo cerrado dominantes se pueden determinar a partir de:

$$(s + \zeta * w_n - w_n * \sqrt{\zeta^2 - 1}) = (s + 0.916)$$

Por lo que el polo deseado es: $s = -0.916$

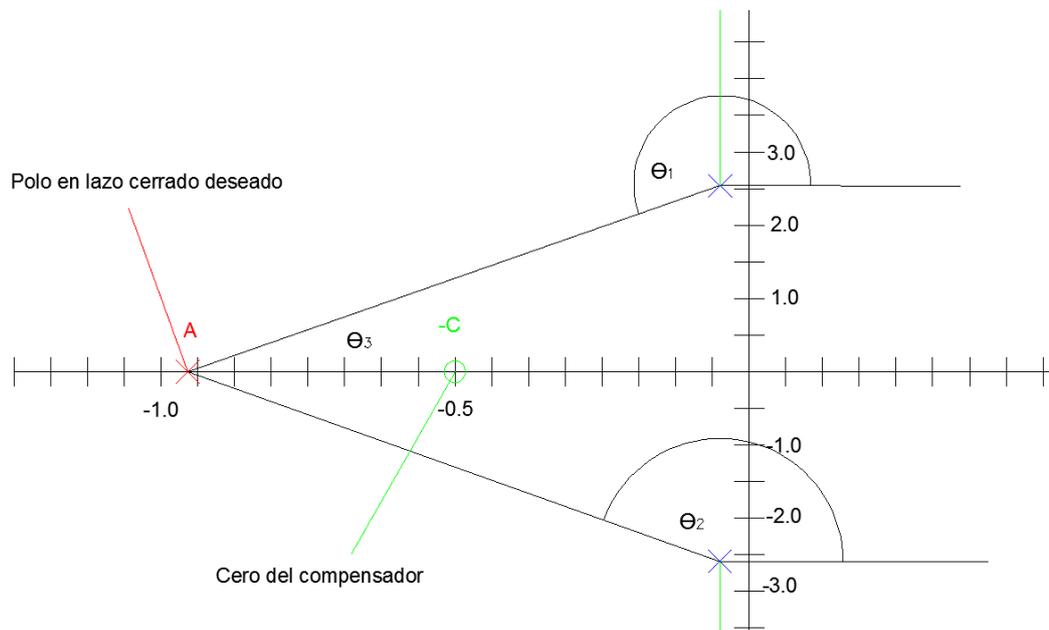


Figura 78 Determinación del cero del compensador PD

De acuerdo a la condición del ángulo de que la diferencia en la suma de los ángulos de los polos y la suma de los ángulos de los ceros debe ser $\pm 180^\circ$.

Por lo tanto el ángulo del compensador debe ser el siguiente:

$$\angle (A + c) = \pm 180^\circ + \theta_1 + \theta_2 \quad \text{Ecuación 70}$$

$$\theta_1 = 180^\circ + \arctan\left(\frac{2.42}{0.916 - 0.0332}\right) = 250^\circ \quad \text{Ecuación 71}$$

$$\theta_2 = 180^\circ - \arctan\left(\frac{2.42}{0.916 - 0.0332}\right) = 110^\circ \quad \text{Ecuación 72}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 70.

$$\angle (A + c) = 180^\circ$$

Por lo tanto si c tiene un valor de 0.5 sí se cumple con la condición del ángulo y de tal forma el controlador queda de la siguiente manera:

Siendo la función de transferencia del controlador el siguiente:

Siendo la función de transferencia del controlador PD:

$$G_c(s) = K_d * \left(\frac{1}{T_d} + s \right)$$

$$K_d = T_d * K_p$$

Ecuación 73

De donde:

K_d: Es la constante derivativa

K_p: Es la constante proporcional

T_d: Es el tiempo derivativo

$$G_c(s) = K_d * (s + 0.5)$$

El valor de *K_d* se puede determinar a partir de la condición de magnitud

$$\left| K_d * (s + 0.5) * \frac{0.00138}{s^2 + 0.066 * s + 5.86} \right|_{s=-0.916} = 1$$

Ecuación 74

$$K_d = \left| \frac{s^2 + 0.066 * s + 5.86}{0.00138 * (s + 0.5)} \right|_{s=-0.916}$$

$$K_d = 2.72$$

Por lo tanto:

$$T_d = 2$$

$$K_p = 1.36$$

$$G_c(s) = 2.72 * (s + 0.5)$$

Es conveniente comprobar el error en estado estacionario, para el sistema que acabamos de diseñar.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \left(\frac{R(s)}{1 + G(s) * Gc(s) * H(s)} \right) \quad \text{Ecuación 75}$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{1}{1 + 2.72 * (s + 0.5) * \frac{5.861}{s^2 + 0.066 * s + 5.861}} \right) = \frac{1}{1 + 1.36} = 0.42$$

Se observa que el error en estado estacionario es aceptable por lo tanto el diseño del controlador es satisfactorio.

El diagrama de bloques del controlador PD del motor paso a paso se muestra a continuación.

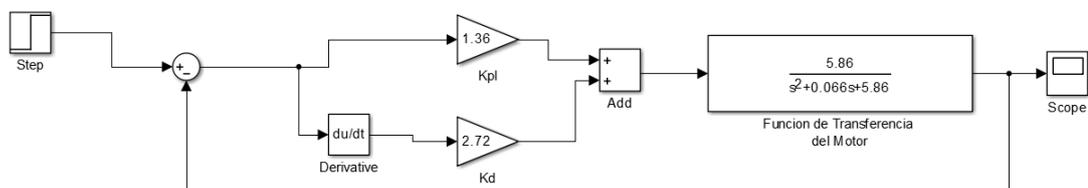


Figura 79 Diagrama de bloques del controlador PD del motor paso a paso 23HS45-4204S

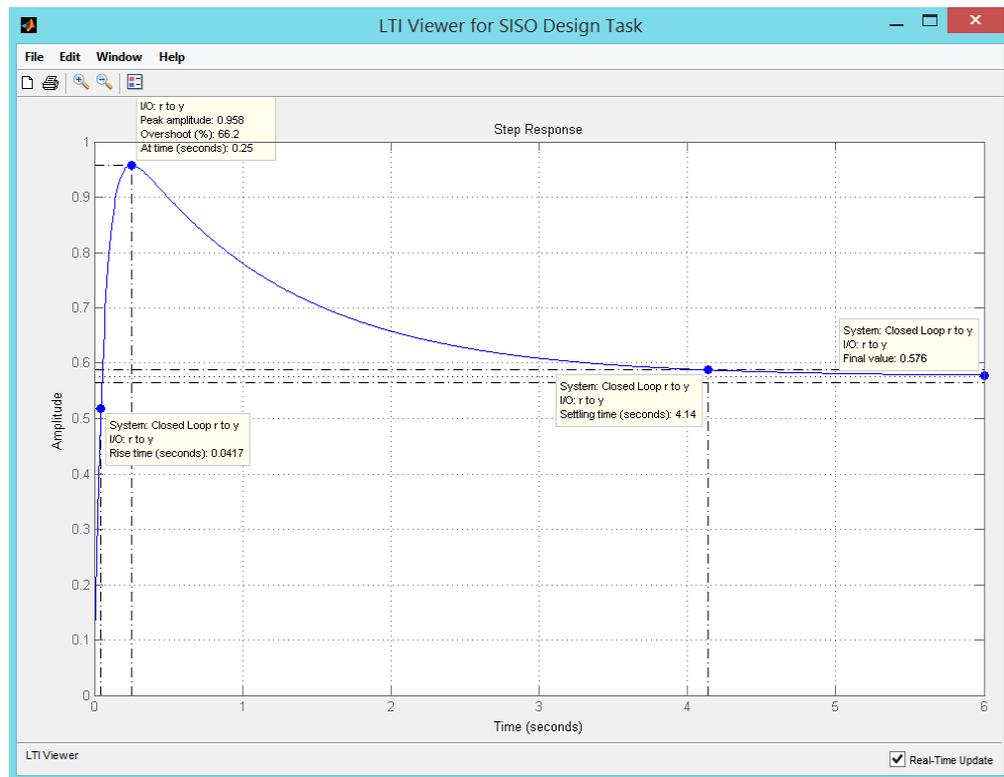


Figura 80 Gráfica de la repuesta a la entrada escalón unitario del sistema de control diseñado

Al examinar la curva de respuesta a la entrada de escalón unitario del sistema diseñado, se observa un sobre pico prolongado así como de un tiempo de establecimiento relativamente alto de 4.14 segundos, por lo cual se vio necesario sintonizar el controlador PD para reducir el máximo pico.

La sintonización que se procedió a realizar fue de elevar el K_p de 1.36 a 10.88 y conservar el K_d , consiguiendo que el controlador de la planta quede de la siguiente manera.

$$G_c(s) = 2.72 * (s + 4)$$

$$T_d = 0.25$$

$$K_d = 2.72$$

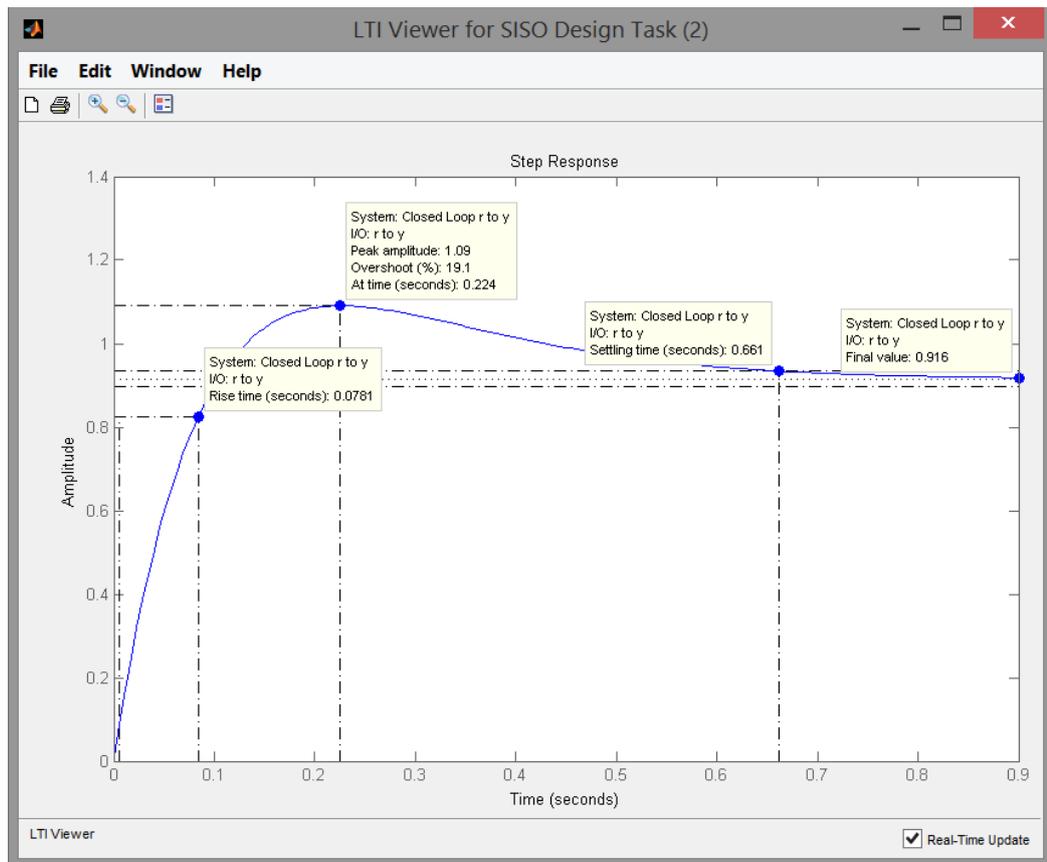


Figura 81 Gráfica de la respuesta a la entrada escalón unitario del sistema de control sintonizado

En la figura 81, podemos apreciar que gracias a la sintonización realizada, el máximo pico se reduce considerablemente del 66.2% al 19.1%; al igual que el tiempo de establecimiento que se reduce de 4.14 segundos a 0.916 segundos, con lo que se optimiza el control de posicionamiento del motor paso a paso, obteniendo un tiempo de respuesta más rápido.

3.2.2.3. SELECCIÓN DEL CONTROLADOR

El controlador es la pieza fundamental de toda máquina, es el cerebro en donde se procesan las señales del sistema para entregar las instrucciones a ejecutarse.

La placa Arduino MEGA 2560 se ha seleccionado como controlador, por los siguientes motivos:

- Se puede implementar el control PD por medio de programación.
- Por su bajo costo, es una de las placas arduino más accesible en el mercado.
- Posee una multiplataforma, es decir que funciona en sistemas operativos como Linux, Macintosh y Windows.
- Su entorno de programación es sencillo y flexible.
- Es de código abierto por lo que su distribución es de licencia libre y puede ser adaptado por programadores expertos.
- Cuenta con un hardware ampliable, está basado en el microcontrolador ATMEGA2560.
- Cuenta con tres puertos de comunicación serial USART.
- Es compatible con el Software para realización de interfaces gráficas Processing.

Tabla 30
Características técnicas del Arduino MEGA 2560

Microcontrolador	ATmega 2560
Tensión de funcionamiento	5 [V]
Voltaje de entrada (recomendado)	7 – 12 [V]
Voltaje de entrada (límites)	6 – 20 [V]
Pines Digitales	54
Pines de entrada analógica	16
Corriente continua para entradas y salidas digitales	40 [mA]
Corriente para el pin de 3.3 [V]	50 [mA]
Memoria Flash	256 [KB]
SRAM	8 [KB]
EEPROM	4 [KB]
Velocidad de reloj	16 [MHz]

Fuente: (Arduino, 2014)

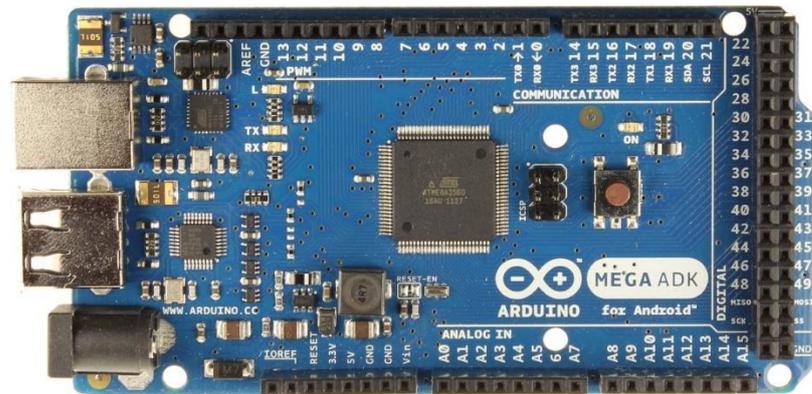


Figura 82 Placa Arduino MEGA 2560

Fuente: (Arduino, 2014)

3.2.2.4. SELECCIÓN SENSOR DE POSICIÓN ANGULAR

Para la selección se va a analizar el encoder que cumpla con las características más adecuadas para permitir el mejor funcionamiento de la máquina.

Requisitos mínimos del sensor de posición angular:

- Rango de pulsos por revolución de 300 a 1200
- Compacto
- Robusto
- Protocolos estándar industrial de señales analógicas (4 a 20 mA)
- De fácil montaje
- Económico
- De alta disponibilidad

Para la selección del sensor, se procederá con la preselección de 3 instrumentos de medición más populares y de fácil adquisición.

- Sensor encoder incremental de karlsson robotics 1024 P/R
- Sensor encoder incremental de Singwise 600 P/R

- Sensor encoder incremental de Singswise 360 P/R

Criterios a evaluar.

Los criterios a evaluar en la matriz de selección tendrán valores diferentes, los cuales sumados darán 100 puntos, definiendo de esta manera que el instrumento con más alto puntaje será el que mejor cumple con los requisitos. Los criterios a ser evaluados son:

- **Resolución:** Es importante que el encoder tenga una alta resolución es decir el que entrega más pulsos por revolución. A este criterio se asignó un valor de 25 puntos, siendo el valor más alto cuando el encoder cuente con la mejor resolución.
- **Mantenimiento:** Es siempre necesario realizar mantenimientos ya sean estos correctivos o preventivos. A este criterio se asignó un valor de 20 puntos, siendo el valor más bajo aquel encoder que cuente con mayor complejidad en mantenimiento.
- **Costo:** A este criterio se asignó un valor de 30 puntos, siendo el valor más alto cuando el encoder sea el más económico.
- **Tamaño:** Es importante que el tamaño del encoder ocupe el menor espacio posible dentro del área de implementación, permitiendo que el sensor se integre fácilmente con la máquina. A este criterio se asignó un valor de 25 puntos, siendo el valor más alto cuando el encoder sea de menor tamaño.

Tabla 31

Criterios a evaluar para la selección del sensor de posición angular.

No	Criterio a Evaluar	Símbolo	Valoración
1	Resolución	R	25
2	Mantenimiento	M	20
3	Costo	C	30
4	Tamaño	T	25
Total:			100

Una vez establecidos los criterios a evaluar con sus respectivas valoraciones se procede a realizar la tabla de evaluación de los sensores de posición angular, para seleccionar el de mejor puntaje.

Tabla 32
Criterios evaluados para la selección del sensor de posición angular.

SISTEMA	ÍTEM	Tipos	CRITERIOS				TOTAL
			R	M	C	T	
Control de posición angular	Encoder Incremental	Karlsson robotics 1024 P/R	25	10	20	20	75
		Singswise 600 P/R	20	20	30	20	90
		Singswise 360 P/R	15	15	25	20	75

Como se puede observar en la Tabla 32, el sensor que mejor puntaje obtuvo de los criterios evaluados fue el sensor Singswise 600 P/R, E6C2-CWZ6C, el cual es un encoder que proporciona 600 pulsos por revolución con una frecuencia de respuesta máxima de 100 [KHz], suficientemente rápida para la aplicación del proyecto. En la figura 83 se muestra este tipo de encoder.



Figura 83 Encoder incremental E6C2-CWZ6C de Singswise

Fuente: (Amazon, Singswise-Incremental-Encoder-Dc5-24v-Voltage, 2015)

Las especificaciones técnicas del encoder incremental E6C2-CWZ6C se encuentran en el ANEXO 7.

3.2.2.5. SELECCIÓN SENSOR DE POSICIÓN LINEAL

Los sensores de posición lineal o de alcance son sensores que miden la distancia desde un punto de referencia (que suele estar en el propio sensor) hasta objetos en el campo de operación del sensor.

Al igual que los sensores de posición angular, el sensor de posición lineal a seleccionar debe cumplir con las características más favorables para su implementación en la máquina.

Los requisitos mínimos que debe cumplir el sensor de alcance son:

- Rango de distancia de 5 a 100 cm
- Robusto
- Compacto
- Salida analógica de 4 a 20 mA
- De fácil montaje
- De fácil adquisición
- Económico

Para la selección del sensor más adecuado, se empezará mediante la preselección de 3 instrumentos de medición que más cumplan con los requisitos mínimos mencionados anteriormente, los cuales son:

- Sensor ultrasonido SainSmart HC – SR04
- Sensor infrarrojo Uxcell E18-B03N1
- Sensor infrarrojo DIY Sharp GP2Y0A21YK0F

En la Tabla 33 podemos apreciar las ventajas y desventajas que tienen los tres instrumentos de medición mencionados.

Tabla 33
Matriz morfológica de la selección del sensor de posición lineal

SISTEMA		CONTROL DE POSICIÓN LINEAL		
ÍTEM:				
Sensor de alcance	SainSmart HC-SR04	Uxcell E18-B03N1	Sharp GP2Y0A21YK0F	
Gráfico				
Ventajas	Robusto	Tamaño compacto	Tamaño compacto	
	Cable de instalación adaptado	Montaje superficial	Montaje superficial	
	Fácil de implementar	Compatibilidad con arduino	Fácil de implementar	
	Compatibilidad con arduino	Amplio rango de medición	Compatibilidad con arduino	
Desventajas	Bajo rango de medición	Implementación compleja	Requiere cableado	
	Gran tamaño	Requiere cableado	Robustez mediana	
	Corriente mayor a 20mA	Robustez mediana	Rango de medición mediana	

Criterios a evaluar:

Los criterios a evaluar en la matriz de selección tendrán valores diferentes, los cuales sumados son 100 puntos, definiendo de esta manera que el instrumento con más alto puntaje será el que cumpla mejor con los requisitos. Los criterios a ser evaluados son:

- **Rango:** Es importante que el rango de medición del sensor sea extenso y nos permita medir la posición lineal del racle por todo su recorrido. A este criterio se asignó un valor de 25 puntos siendo el valor más alto el sensor que más alcance presente.

- **Montaje:** Este criterio tiene mucho que ver con la forma y dimensiones del sensor. Se asignó un valor de 20 puntos, siendo el valor más alto cuando el sensor sea el más fácil de montar.
- **Mantenimiento:** Es siempre necesario realizar mantenimientos ya sean estos correctivos o preventivos. A este criterio se asignó un valor de 20 puntos, siendo el valor más bajo aquel sensor que cuente con mayor complejidad en mantenimiento.
- **Costo:** El costo de la adquisición del sensor de alcance debe resultar ser lo más rentable posible, es decir que para la aplicación su compra sea justificada. A este criterio se asignó un valor de 30 puntos, siendo el valor más alto cuando el encoder sea más rentable de adquirir.
- **Implementación:** Es importante que la implementación para el funcionamiento del sensor de alcance sea sencillo de programar y configurar. A este criterio se asignó un valor de 20 puntos, siendo el valor más bajo aquel sensor que cuente con mayor complejidad de implementación.

Tabla 34
Criterios a evaluar para la selección del sensor de posición lineal.

No	Criterio a Evaluar	Símbolo	Valoración
1	Rango	R	25
2	Montaje	MO	20
3	Mantenimiento	M	10
4	Costo	C	20
5	Implementación	I	25
		Total:	100

Una vez establecidos los criterios a evaluar con sus respectivas valoraciones se procede a realizar la tabla de evaluación de los sensores de posición lineal, para seleccionar el de mejor puntaje.

Tabla 35
Criterios evaluados para la selección del sensor de posición lineal.

SISTEMA	ÍTEM	Tipos	CRITERIOS					TOTAL
			R	MO	M	C	I	
Control de posición lineal	Sensor de alcance	SainSmart HC-SR04	25	20	5	10	10	70
		Uxcell E18-B03N1	10	10	8	15	20	63
		Sharp GP2Y0A21YK0F	20	20	8	18	22	88

Como se puede apreciar en la tabla 35, el sensor de alcance mejor puntuado es el sensor infrarrojo DIY Sharp GP2Y0A21YK0F con compatibilidad con el controlador arduino.

Este sensor tiene una distancia de medición de 10 a 80 [cm], alimentado por un voltaje de 4.5 a 5.5 [V], cuyas características técnicas se encuentran en el ANEXO 8. Mediante la figura 84, podemos observar la salida de voltaje que entrega este sensor con respecto a la inversa de la distancia a la que se encuentre el objeto a sensor.

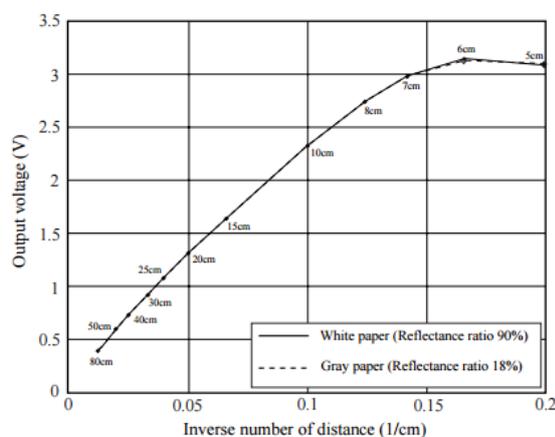


Figura 84 Diagrama de la salida de voltaje del sensor Sharp GP2Y0A21YK0F

Fuente: (AliExpress, 2015)

3.2.2.6. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL PROVENIENTE DEL ENCODER INCREMENTAL

Para el acondicionamiento de la señal proveniente del encoder incremental se utilizará un circuito que la amplifica en modo corte-saturación. Normalmente la salida del encoder incremental entrega una señal cuadrada supuestamente digital, pero en realidad es analógica. Para que esta señal pseudo-cuadrada sea lo más digital posible se la ha de amplificar lo suficiente para evitar estados intermedios.

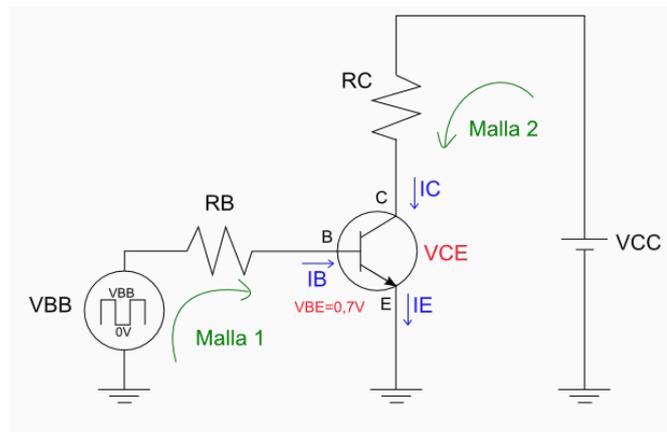


Figura 85 Circuito amplificador de señal modo corte-saturación

Fuente: (Propia)

El circuito a implementar es el que se muestra en la figura 85, el transistor utilizado es el 2N2222 NPN con un β igual a 220, por lo que es necesario encontrar los valores de R_B y R_C correspondientes.

En la figura 85, la señal de entrada es una onda cuadrada, la cual tiene un valor mínimo de 0 [V] y un valor máximo de V_{BB} , que es la señal de salida del encoder.

La señal amplificada será el voltaje de V_{CE} el cual tiene un valor igual a V_{CC} cuando la señal V_{BB} es cero y un valor negativo cuando I_C llegue al

valor de saturación. Por lo tanto de la malla 2 tenemos las siguientes ecuaciones:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C * I_C \quad \text{Ecuación 76}$$

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad \text{Ecuación 77}$$

De donde $V_{CC} = 5 \text{ V}$ y $R_C = 1000 \text{ } \Omega$

$$I_{Csat} = \frac{5 \text{ [V]}}{1000 \text{ [}\Omega\text{]}}$$

$$I_{Csat} = 5 \text{ [mA]}$$

Por lo tanto:

$$I_B = \frac{I_{Csat}}{\beta} \quad \text{Ecuación 78}$$

$$I_B = \frac{5 \text{ [mA]}}{220}$$

$$I_B = 22.72 \text{ [}\mu\text{A]}$$

Para encontrar el valor adecuado de R_B para asegurar la saturación. De la malla 1 se tiene:

$$V_{BB} = I_B * R_B + V_{BE} \quad \text{Ecuación 79}$$

De donde V_{BE} es la tensión mínima de control para encender el diodo base emisor igual a 0.7 [V] .

$$R_B = \frac{V_{BB} - 0.7}{I_B} \quad \text{Ecuación 80}$$

Resulta que β se ve afectada por la temperatura y por la IC, por lo cual si β cambia, IB cambiará y esta a su vez cambiará el valor de IC, lo cual podría sacar al transistor de la saturación, por ese motivo se hace que:

$$IB = \frac{5 \cdot IC_{sat}}{\beta} \quad \text{Ecuación 81}$$

De esta forma se logra asegurar la saturación ya que si β cambia IB cambiará pero ICsat no se verá afectada. De esta manera obtenemos:

$$RB = \frac{V_{BB} - 0.7}{\frac{5 \cdot IC_{sat}}{\beta}} \quad \text{Ecuación 82}$$

$$RB = \frac{(3 - 0.7)[V]}{\frac{5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}[A]}{220}}$$

$$RB = 20.240 [K\Omega]$$

Realizando la simulación del circuito con los valores de las resistencias encontradas y utilizando del software de ingeniería proteus, logramos observar mediante el osciloscopio digital que la señal de entrada (azul) al pasar por el circuito amplificador de modo corte – saturación, nos entrega una señal de salida (amarilla) totalmente digital y amplificada, ver figura 86.

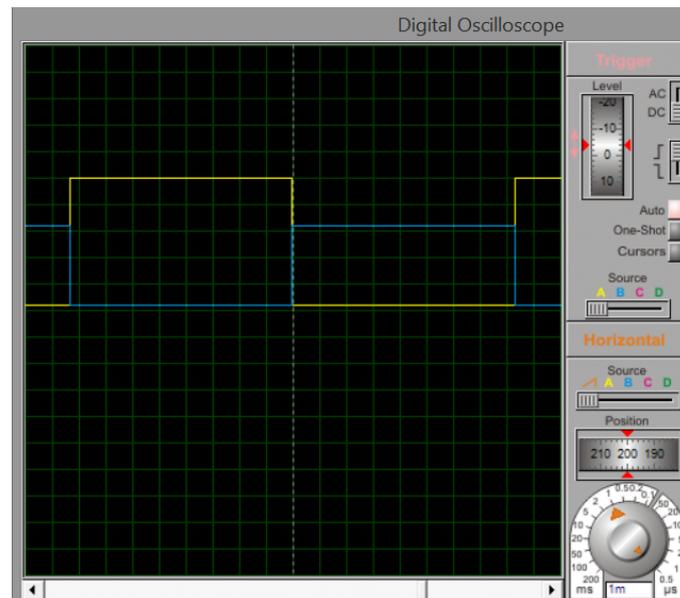


Figura 86 Visualización de las señales de entrada y salida del circuito amplificador modo corte - saturación

3.2.3. SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

3.2.3.1. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LOS ACTUADORES

Para seleccionar la fuente de poder que abastezca la demanda de potencia que consumen los motores de la máquina, realizamos la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 36
Potencia consumida por los actuadores

Actuador	Cantidad	Potencia (W)	Potencia + 10% (W)
Nema 23HS45-4204S	2	168	184.8

Considerando además que los motores funcionan a 24 voltios DC se selecciona la fuente de alimentación regulable X-360-24 de 360 [W] (24 [V] DC - 15 [A]), que es lo suficientemente potente para suministrar la energía requerida a los motores.



Figura 87 Fuente de voltaje 110 VAC a 24 VDC- 15 A

Fuente: (Amazon, Switching-Transformer-Regulated-Computer-Project, 2015)

3.2.3.2. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE SENSORES Y AMPLIFICADORES

Para seleccionar la fuente de poder que abastezca la demanda de corriente y voltaje que necesitan los sensores y amplificadores para su funcionamiento, es necesario conocer la cantidad total de corriente que consumen dichos elementos, la siguiente tabla nos ayudará a seleccionar la fuente de alimentación más adecuada.

Tabla 37
Elementos a 5VDC

No.	Elemento	Corriente	Consumo Total Pico
1	Sensor encoder incremental	35 mA	100 mA
2	Sensor infrarrojo	35 mA	200 mA
3	Circuito amplificador corte y saturación	45 mA	150 mA
4	Canal de Relé AC250V 10A DC30V 10A	60 mA	150 mA
5	2 Stepper Driver	60 mA	150 mA
TOTAL			750 mA



Figura 88 Fuente de voltaje 110 VAC a 5 VDC - 1A

Fuente: (Amazon, 2016)

3.2.3.3. CIRCUITO DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGAS

El propósito del circuito de protección contra sobrecarga es evitar que la corriente que circula por el transistor en serie, en este caso la que proporciona la fuente de poder de 24 [V], exceda un nivel de seguridad predeterminado,

El circuito de protección a que se diseñará utiliza la técnica denominada limitación de corriente foldback basado en el circuito descrito en la Figura 89.

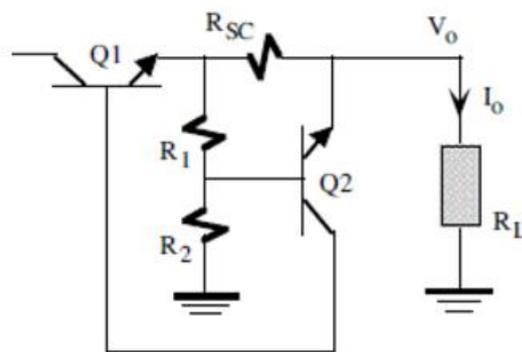


Figura 89 Circuito de protección de corriente foldback

Fuente: (Electrónica Unicrom, 2016)

La idea de la limitación foldback es reducir la corriente y la tensión de la carga cuando ocurren las condiciones de sobrecarga.

En la Figura 90 se muestra la característica V_o e I_o típica de una salida de voltaje con limitación foldback. Una vez que se alcanza la corriente de carga máxima (I_{FB}), el voltaje de salida disminuye y la corriente de la carga se reduce. Esto reduce la disipación de potencia del regulador y del resto de los componentes de la fuente de alimentación.

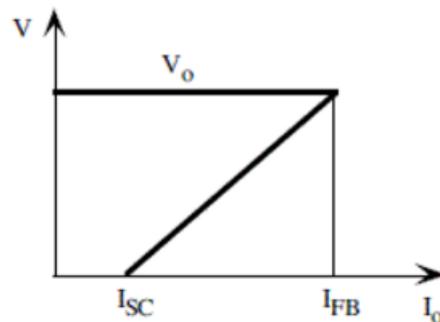


Figura 90 Curva de limitación de corriente foldback

Fuente: (Electrónica Unicrom, 2016)

Bajo condiciones normales de carga R_1 , R_2 , y Q_2 no tienen efecto en la operación del circuito. Bajo condiciones de sobrecarga, la caída de tensión en R_{SC} hará que Q_2 conduzca, robando corriente de base a Q_1 y produciendo una disminución en la tensión de salida. La disminución de V_o reduce aún más la caída de tensión en R_1 , haciendo que Q_2 se sature y reduciendo aún más la corriente y la tensión de la carga. Las intensidades I_{FB} e I_{SC} están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$I_{FB} = V_o * \frac{R_1}{R_2 * R_{SC}} + V_{BE} * \frac{R_1 + R_2}{R_2 * R_{SC}} \quad \text{Ecuación 83}$$

$$I_{SC} = \frac{V_{BE}}{R_{SC}} * \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad \text{Ecuación 84}$$

Definiendo las siguientes consideraciones:

$$R_1 = 2[K\Omega]$$

$$R_{SC} = 100[\Omega]$$

$$R_2 = 120[\Omega]$$

$$V_o = 24 [V]$$

$$V_{BE} = 0.7 [V]$$

El transistor que se utilizará para Q1 y Q2 es el 2N3904. Reemplazando dichos valores en la Ecuación 83 y en la Ecuación 84, encontramos el valor de las intensidades de las corrientes mencionadas.

$$I_{FB} = 24[V] * \frac{2000[\Omega]}{120 [\Omega] * 100[\Omega]} + 0.7[V] * \frac{2000 [\Omega] + 120[\Omega]}{120 [\Omega] * 100[\Omega]}$$

$$I_{FB} = 4.120 [A]$$

$$I_{SC} = \frac{0.7 [V]}{100 [\Omega]} * \frac{2000[\Omega] + 120 [\Omega]}{120 [\Omega]}$$

$$I_{SC} = 123.66 [mA]$$

Con lo que finalmente utilizando el valor de las resistencias definidas y aplicando el circuito planteado, comprobamos que el circuito protector se disparará a sobre corrientes mayores a los 4 [A], llegando a proteger de sobre intensidad a todos los elementos electrónicos del sistema.

3.3. SELECCIÓN DEL SOFTWARE PARA DESARROLLO DEL HMI

La interfaz humano-máquina (HMI) es la interfaz que permite al operador entrar en contacto con el proceso de control de la máquina de una manera sencilla y amigable. Permitiendo monitorear y controlar el proceso de

impresión de la máquina serigráfica automatizada por medio de la pantalla del computador.

En la actualidad existen varios softwares que facilitan la implementación del HMI, mediante entornos de programación en base de imágenes, librerías que facilitan la comunicación con las tarjetas de control entre otras opciones, siendo los más sofisticados los más caros.

A continuación se desarrollará una tabla comparativa de los distintos softwares privados y de código abierto existentes para la programación del control HMI de los sistemas automatizados con compatibilidad con arduino.

Tabla 38
Tabla comparativa de softwares para desarrollo de HMI

Software	Lenguaje de Programación	Editor de interfaces de usuario	Librerías para adición de aplicaciones	Costo de licencia
Matlab	Lenguaje M	Avanzado	Avanzada	\$ 5000
Labview	Lenguaje G	Avanzado	Avanzada	\$ 4900
Processing	Java	Mediano	Avanzada	Sin costo
Instrumentino	Python	Bajo	Básica	Sin costo

Una vez analizada la tabla 38 se consideró utilizar el software de programación Processing para la implementación del HMI, debido a que su licencia es gratuita, por su lenguaje de programación, las herramientas de edición de interfaces de usuario que posee y su extensa cantidad de librerías que existen en la actualidad, que van desde crear aplicaciones networking hasta aplicaciones de video stream.

Software Processing:

Processing es un lenguaje de programación de código abierto y un entorno de desarrollo integrado (conocido por sus siglas en inglés IDE), construido para las artes electrónicas y de diseño visual con el propósito de enseñar los fundamentos de la programación de computadoras en un contexto visual y para servir de base para la creación de los conocidos sketchbooks.



Figura 91 Página oficial de Processing.org

El proyecto fue iniciado Casey Reas y Ben Fry, quienes conformaban el grupo de computación y estética en el laboratorio de Media del MIT. El lenguaje se basa en el lenguaje Java, pero utiliza un simplificado modelo de programación gráfico.

Todo sketch en Processing es en realidad una subclase de Papplet de Java class que implementa casi la mayoría de las características del lenguaje de Processing.

Al programar en Processing, todas las clases adicionales definidas serán tratadas como clases internas cuando el código es traducido en Java antes de compilar. Esto significa que el uso de variables estáticas y métodos en las

clases están prohibidas a menos que explícitamente se le diga a Processing que se quiere programar en modo totalmente Java.

Processing también permite a los usuarios crear sus propias clases dentro del sketch PApplet. Esto permite que los tipos de datos complejos pueden incluir cualquier número de argumentos y evita las limitaciones de únicamente utilizar tipos de datos estándar, tales como: int (entero), char (caracter), float (número real), y color (RGB, ARGB, hex).

Processing ha dado lugar a Wiring, que utiliza el IDE de procesamiento con una colección de bibliotecas escritas en el lenguaje C ++ como una manera para programar microcontroladores, tales como arduino.

Gracias a la Herramienta GUI Builder se facilita mucho la elaboración de una pantalla HMI, por lo que se cuenta por cada icono o botón una lista de propiedades configurables a la conveniencia del programador, ver figura 92.

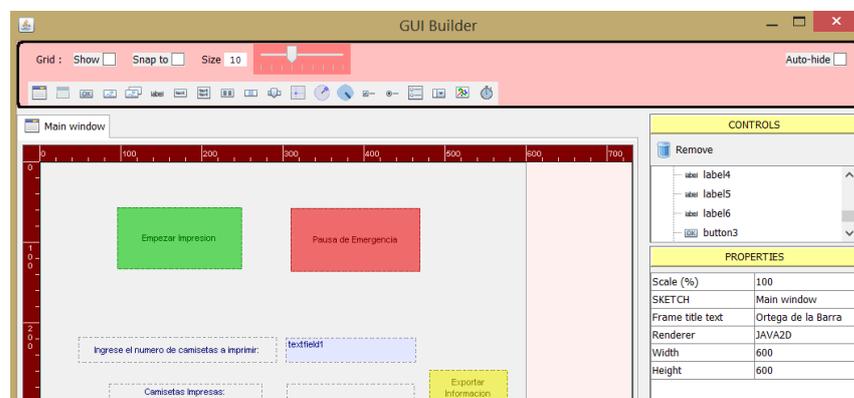


Figura 92 GUI Builder de Processing 2.2.1

Fuente: (Reas & Fry, 2014)

3.4. IMPLEMENTACION DE LA MÁQUINA SERIGRÁFICA AUTOMATIZADA

3.4.1. IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA

Luego de que todos los elementos mecánicos han sido dimensionados y manufacturados, se procede a ensamblar la estación de máquina serigráfica automatizada.

Lo primero que se ensambla es el eje sobre la base cilíndrica y la brida que sujeta al motor, para comprobar que el engranaje del sistema de reducción funcione correctamente, debido a la buena alineación y acople del piñón con el engrane, ver figura 93.



Figura 93 Ensamble del engranaje para el giro de los brazos que transportan las camisetas

Posteriormente se unen los brazos giratorios al eje del engranaje por medio de pernos y tuercas, lo que permitirá que el eje gire conjuntamente con los brazos potenciados por el motor seleccionado, ver figura 94.



Figura 94 Unión brazos giratorios – eje de engranaje mediante pernos

Finalmente se acoplan las bases para camisetas a los brazos giratorios con lo que el ensamble completo de la primera etapa de la máquina queda como se muestra en la figura 95.



Figura 95 Ensamble final de los brazos giratorios de la máquina

En la figura 95, también se puede evidenciar también que los brazos giratorios cuentan con un agujero donde se encuentra la sección superior de la base cilíndrica enroscada para el futuro ensamble de la primera etapa de la máquina con el brazo de impresión.

Para el ensamble del brazo de impresión es importante que el eje del husillo de bolas se encuentre totalmente alineado y concéntrico con los centros de los rodamientos de apoyo PLBU 16, BUF 16 y de la flecha del motor.

Por esta razón se empezó acoplando el motor Nema 23 con el eje del husillo de bolas mediante prisioneros. Los rodamientos de apoyo están sujetos al brazo de impresión mediante pernos, de tal forma que la alineación del eje no se pierda y que la tuerca del husillo de bolas se desplace sin dificultad.

En la figura 96 se puede observar el ensamble de todos los componentes del brazo de impresión.



Figura 96 Ensamble de los complementos del brazo de impresión

Otro aspecto importante en el ensamble es que el brazo de impresión debe quedar totalmente paralelo a los brazos que transportan las camisetas, puesto que si existiese una inclinación hacia arriba el racle no llegaría a presionar sobre el tejido de la malla o caso contrario la presión sobre el tejido sería muy grande que dañaría el material.

En la figura 97, se puede apreciar que el brazo una vez enroscado a la base, sí llega a cumplir con lo estipulado, y además se aprecia el acople de la tuerca del husillo de bolas junto al cilindro de doble efecto, el cual es el responsable de transportar el racle de impresión, cuyo accionamiento está controlado por una válvula solenoide.



Figura 97 Ensamble del brazo de impresión a la máquina

3.4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

Después de que toda la parte mecánica de la máquina serigráfica ha sido ensamblada, se procede a interconectar y ubicar todos los componentes eléctricos y electrónicos, diseñados y seleccionados en la sección 3.2.

De modo en que todos los actuadores eléctricos ya fueron acoplados dentro del ensamble mecánico, se tuvo que ubicar a los instrumentos de medición de la mejor manera, para que logren sensor cada posicionamiento sin inconvenientes. El proceso de ubicación de cada sensor se detalla a continuación.

Para ubicar el Sensor IR DIY Sharp GP2Y0A21YK0F fue necesario considerar el sitio más adecuado para que a lo largo del eje del husillo de bolas, el mismo pueda medir el desplazamiento del cuerpo que sostiene la rasqueta. Además se consideró que el sensor debe encontrarse lo más cercano al centro de la máquina para implementar menor cableado. Por medio de estas consideraciones se ubicó al sensor IR anexado a la parte inferior del rodamiento de apoyo PLBU16, como se muestra en la figura 98.

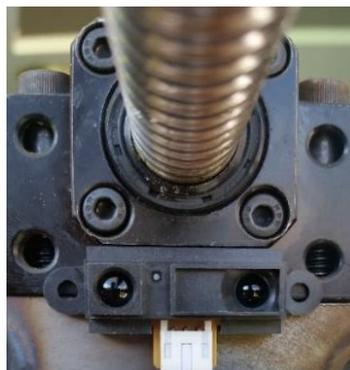


Figura 98 Ubicación del sensor IR GP2Y0A21YK0F

En cambio para ubicar el encoder E6C2-CWZ6C, se tuvo que maquinar una brida sobre el soporte del motor que gira los brazos, para que sobre ella se pueda colocar el encoder; con el fin que su flecha quede acoplada al

piñón por medio de prisioneros, el acoplamiento se puede apreciar en la figura 99.



Figura 99 Acople encoder incremental – piñón

De acuerdo al diseño del circuito amplificador de modo corte – saturación para el acondicionamiento de las señales entregadas por el encoder incremental, obtenido en la sección 3.2.2.6, se procedió a realizar el diseño PCB de la placa del circuito como se muestra a continuación.

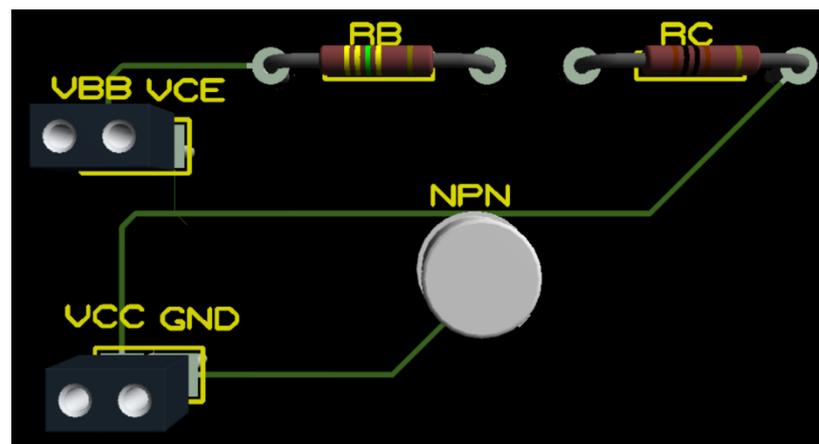


Figura 100 Diseño PCB circuito de amplificación modo corte – saturación

De acuerdo al diseño del circuito de protección para los elementos electrónicos de la máquina contra sobre cargas obtenidos en la sección

3.2.3.3; se procedió a realizar el diseño PCB de la placa del circuito como se muestra a continuación.

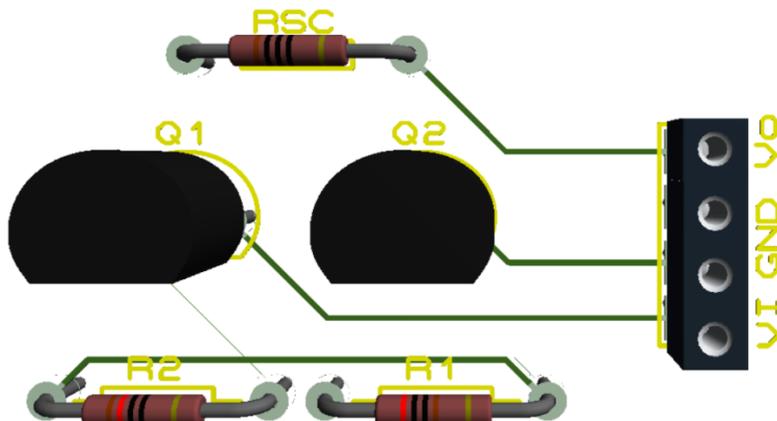


Figura 101 Diseño PCB del circuito de protección contra sobrecarga

Finalmente la elaboración de las placas mencionadas anteriormente se visualizan en la figura 102.



Figura 102 Elaboración de las placas PCB del circuito acondicionador y del circuito protector de contra sobre corrientes

Una vez ubicados los instrumentos de medición, y elaboradas las placas del circuito acondicionador como del circuito protector de contra sobre

cargas. Fue necesario definir los esquemas de conexiones de estos y el resto de los componentes eléctricos y electrónicos, responsables del funcionamiento automático de la máquina serigráfica.

El primer esquema que se definió fue el de las conexiones entre los instrumentos de medición, acondicionadores, la tarjeta arduino Mega 2560, y la fuente de alimentación de 5 voltios, ver figura 103.

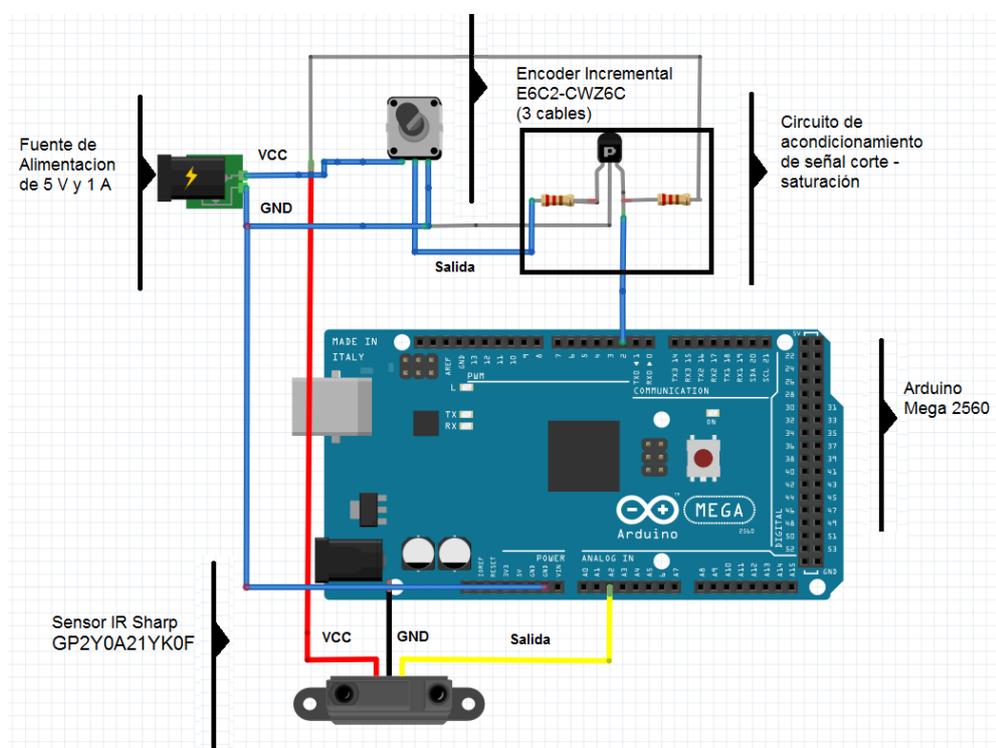


Figura 103 Esquema de conexiones instrumentos de medición con la tarjeta Arduino Mega 2560

Fuente: (Propia)

Descripción del esquema de conexiones:

- El encoder incremental E6C2-CWZ6C cuenta con dos cables de alimentación y uno de salida digital. La salida que entrega el encoder son pulsos que necesitan ser amplificados y acondicionados para su

correcta lectura por medio del pin 2 del Arduino Mega 2560, donde se ha utilizado la función `attachInterrupt()`.

- El sensor infrarrojo GP2Y0A21YK0F cuenta con dos cables de alimentación y uno de salida analógica. Este tipo de sensor viene a ser fabricado para ser compatible con las tarjetas arduino por lo que no requiere de acondicionamiento. La salida del sensor está conectada al pin A2 del puerto de entradas analógicas de la tarjeta Arduino Mega 2560.

El siguiente esquema que se definió fue el de las conexiones entre los stepper drivers (tarjeta TB6560), motores de paso, fuente de alimentación de 24 voltios y la tarjeta arduino Mega 2560, ver figura 104.

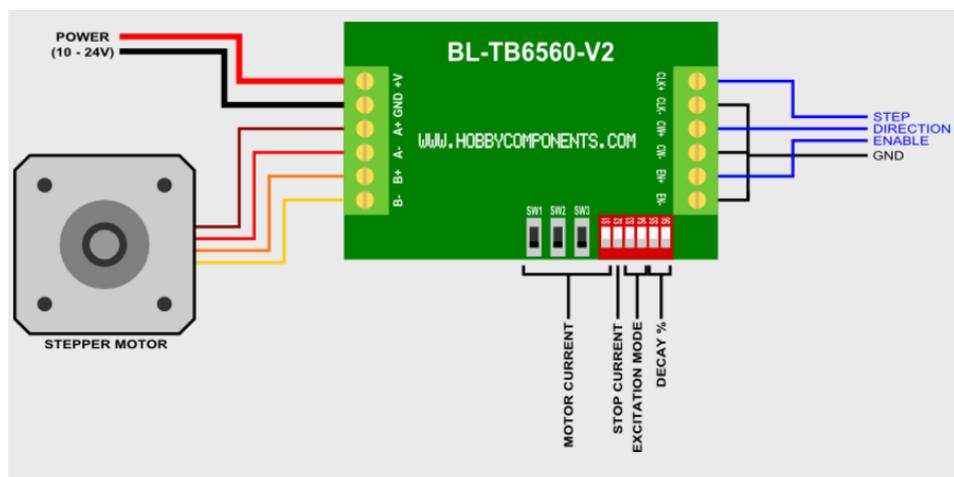


Figura 104 Esquema de conexiones del motor paso a paso y la tarjeta TB6560

Fuente: (Hobby Components, 2014)

Descripción del esquema de conexiones:

- Las entradas EN, CW y CLK son opto-aislado. Como se las conecta directamente a la tarjeta arduino, se deben conectar a tierra el EN-, CW- y CLK-, de la tarjeta TB6560.

- CW (Entrada de dirección): Si se pone en tierra o cero lógico el pin CW+ provocara que el motor gire en sentido anti horario. Proporcionar un lógico alto causará que el motor gire en sentido horario.
- CLK (Entrada Paso): Pulsando continuamente la entrada CLK+ hará que el motor de un paso en una dirección. Dependiendo de la configuración del modo de excitación (a través de los conmutadores SW3 y 4) el motor dará un paso por cada 1 o 16 pulsos que reciba CLK+.
- Los pines digitales del 22 al 24 de la tarjeta arduino Mega 2560 estarán reservadas para el control (EN+, CLK+, CW+) del motor paso a paso que realiza el giro de los brazos y los pines del 32 al 34 para el motor responsable del avance del racle de impresión.

3.4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

Programación del controlador

La programación del sistema de control se divide en dos etapas, debido a los dos actuadores que lo conforman, toda la codificación se encuentra grabada en la tarjeta ATmega 2560 del controlador.

La primera etapa de la programación es el control del motor paso a paso que realiza el posicionamiento de los brazos giratorios. Su funcionamiento se basa en la utilización de un driver, un encoder y ordenador cargado con el software Processing, como se muestra en la figura 105.

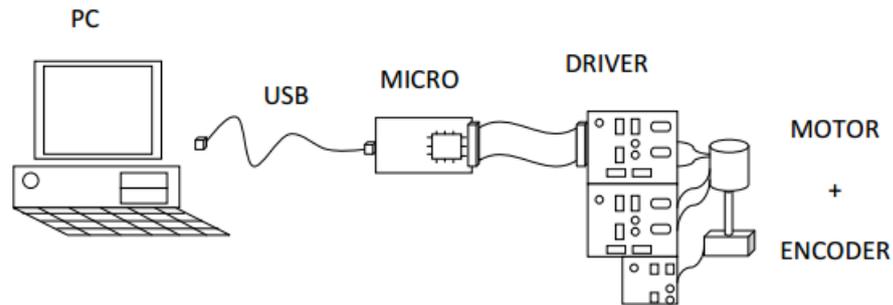


Figura 105 Esquema de conexión del motor a pasos responsable del giro de los brazos.

Fuente: (Propia)

Para encontrar el algoritmo de programación del control PD del motor retroalimentado por el encoder incremental, con una resolución de 600 pulsos por revolución, se espera que el piñón acoplado al encoder gire 208° , lo que significaría que los brazos se posicionen en los 346 pulsos obtenidos por el encoder.

Se conoce además que al arrancar el motor el posicionamiento aumenta 20 pulsos cada segundo. Y que el tiempo derivativo T_d es de 0.25 segundos para el control de posición de un motor paso a paso (ver sección 3.2.2.2). Con lo que se realizan los siguientes cálculos para definir el algoritmo de control de la salida con respecto a la entrada.

$$Salida = \left[100\% * \frac{E - D * Vel.}{banda} \right] \quad \text{Ecuación 85}$$

$$E = SP - PV \quad \text{Ecuación 86}$$

$$banda = Pb * \frac{SP}{100\%} \quad \text{Ecuación 87}$$

De donde:

banda: Banda del control PD

SP: Set point igual a 346 pulsos.

PV: Valor medido por el encoder

Pb: Banda proporcional igual a 20%

D: Tiempo derivativo.

Vel: Velocidad del cambio de la entrada igual a 20 pulsos/s

$$banda = 20\% * \frac{346 \text{ pulsos}}{100\%} = 69 \text{ pulsos}$$

$$Salida = \left[100\% * \frac{(346 - PV) - 5 \text{ pulsos}}{69 \text{ pulsos}} \right]$$

$$Salida = \left[100\% * \frac{(341 \text{ pulsos} - PV)}{69 \text{ pulsos}} \right]$$

La segunda etapa de la programación se trata del control del motor paso a paso que desplaza el racle de impresión, retroalimentado por un sensor infrarrojo. La resolución del convertidor análogo digital de la tarjeta ATmega 2560 es de 10 bits, es decir que el ADC entrega una lectura de 102 cuando el racle haya llegado a una distancia de 600 [mm] (0.5 [V]) y una lectura de 613 cuando el racle tenga una distancia 50 [mm] (3 [V]) del sensor.

Se define que la lectura de la entrada aumenta 24 valores por segundo, y el tiempo derivativo es de 0.25 segundos para el control de posición de un motor paso a paso (ver sección 3.2.2.2). Por lo tanto para hallar el algoritmo de programación del control para llevar el racle a su posición inicial, se calculan los siguientes parámetros:

Parámetros de control:

SP: Set point igual al valor de 613 obtenido por el ADC.

PV: Valor medido por el ADC

Pb: Banda proporcional igual a 20%

D: Tiempo derivativo.

Vel: Velocidad del cambio de la entrada igual a 24 valores por segundo.

$$banda = 20\% * \frac{613}{100\%} = 122$$

$$Salida = [100\% * \frac{(613 - PV) - 6}{122}]$$

$$Salida = [100\% * \frac{(607 - PV)}{122}]$$

Una vez obtenidos los algoritmos de control de posición de los motores paso a paso. Se procedió a diseñar el diagrama de flujo que explica la estructura de la programación del sistema de control que se grabará dentro de la tarjeta ATmega 2560, ver figura 106.

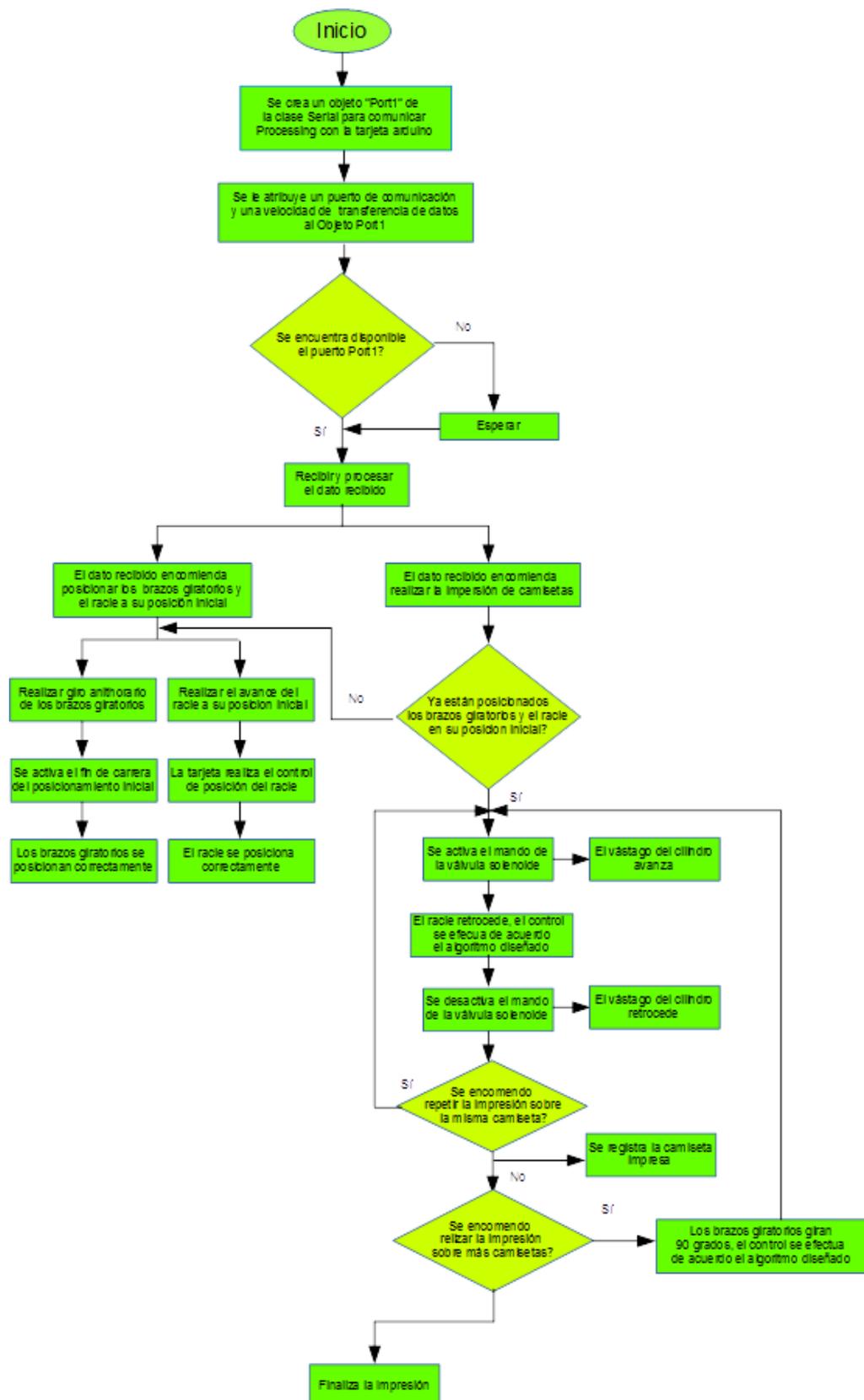


Figura 106 Diagrama de flujo de la programación del sistema de control

Programación e implementación del HMI:

El diseño y programación del HMI cuenta con una ventana de acceso, una ventana de mando para operadores y otra para administradores; su funcionamiento se explica mediante el siguiente diagrama de flujo, ver figura 107.

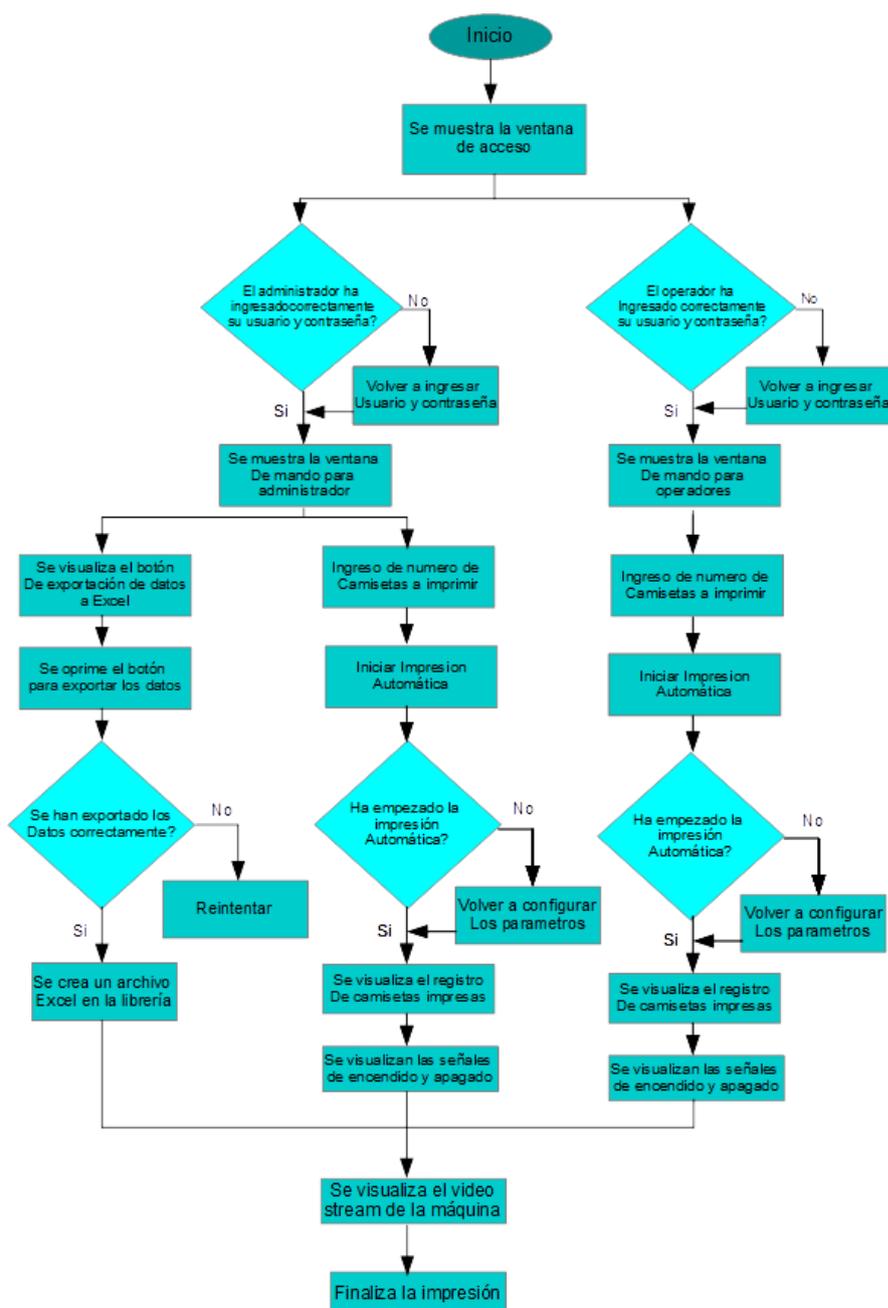


Figura 107 Diagrama de flujo del funcionamiento del HMI

El principio de comunicación del HMI con el controlador es mediante comunicación serial entre la tarjeta y el computador servidor. Para iniciar la programación del HMI fue necesario configurar la velocidad de transferencia de datos a 9600 baudios, además de definir el puerto USB serial que estará conectada la tarjeta arduino al computador.

Dentro de la ventana de acceso, el primer nivel de la jerarquía de admisión es para el administrador y el segundo para el operario, es decir que cada uno de ellos contará con su propia clave. De donde el administrador es el único que podrá tener acceso al historial de la máquina por medio del botón “Exportar Información”, que al realizar un click sobre este, todo el registro de impresiones realizadas en el día será exportado a una tabla de Excel.

La programación de las ventanas de acceso y de las ventanas de mando, con sus respectivas clases heredadas y funciones de la librería g4p control, se detalla a continuación.

Ventana de Acceso:



Figura 108 Clases utilizadas en la ventana de acceso

// Para comenzar se declaran los objetos que se utilizaran para cada clase de la ventana de acceso.

GLLabel label1; // Objeto que se declara para visualizar el título "Ingreso de usuario y contraseña"

GTextField textfield1; // Objeto que se declara para el ingresar el nombre del usuario.

GPassword password1; // Objeto que se declara para ingresar la contraseña.

GButton button1; //Objeto que se declara para utilizar el botón de ingreso.

GLLabel label2; //Objeto que se declara para visualizar el texto "Ingreso de Usuario".

GLLabel label3; //Objeto que se declara para visualizar el texto "Ingreso de contraseña".

// Se inicializa cada objeto y se le agrega su respectivo atributo.

label1 = new GLLabel (this, 145, 75, 136, 28);

label1.setText ("Ingreso de Usuario y Contraseña");

label1.setTextBold ();

label1.setOpaque (false);

textfield1 = new GTextField (this, 223, 119, 160, 30, G4P.SCROLLBARS_NONE);

textfield1.setOpaque (true);

textfield1.addEventHandler (this, "textfield1_change1");

password1 = new GPassword (this, 223, 172, 160, 30);

```

password1.setMaxWordLength (10);
password1.setOpaque (true);
password1.addEventHandler (this, "password1_change1");
button1 = new GButton (this, 173, 240, 80, 30);
button1.setText ("Ingreso");
button1.setTextBold ();
button1.setLocalColorScheme (GCScheme.GREEN_SCHEME);
button1.addEventHandler (this, "button1_click1");
label2 = new GLabel (this, 74, 123, 123, 20);
label2.setText ("Ingreso de Usuario");
label2.setOpaque (false);
label3 = new GLabel (this, 26, 180, 181, 20);
label3.setText ("Ingreso de Contraseña");
label3.setOpaque (false);

```

// Función de eventos del botón de ingreso para validar el usuario y contraseña.

```

public void button1_click1(GButton source, GEvent event) {
    println("button1 - GButton >> GEvent." + event + " @ " + millis());
    if(event==GEvent.CLICKED){
        int contrasenia=Integer.parseInt(password1.getPassword());

        //comprobarContrasenia();
        if(contrasenia==12345 && textfield1.getText()=="administrador"){
            crearVentanaDeAdministrador();
        }
        if(contrasenia==54321 && textfield1.getText()=="operador"){
            crearVentanaDeOperador();
        }
        else{
            println("Usuario o contraseña equivocada, vuelva a ingresar");
        }
    }
}

```

Ventana de mando:

La ventana de mando contará de dos secciones, la primera es donde se visualizan los botones y paneles que sirven para controlar la máquina serigráfica desde el ordenador, y en la otra sección dentro de la misma ventana, se visualizará un video stream que enfoca a la máquina desde su perspectiva posterior para que de esta manera el operador o administrador pueda monitorear todo lo que sucede en la máquina en tiempo real.

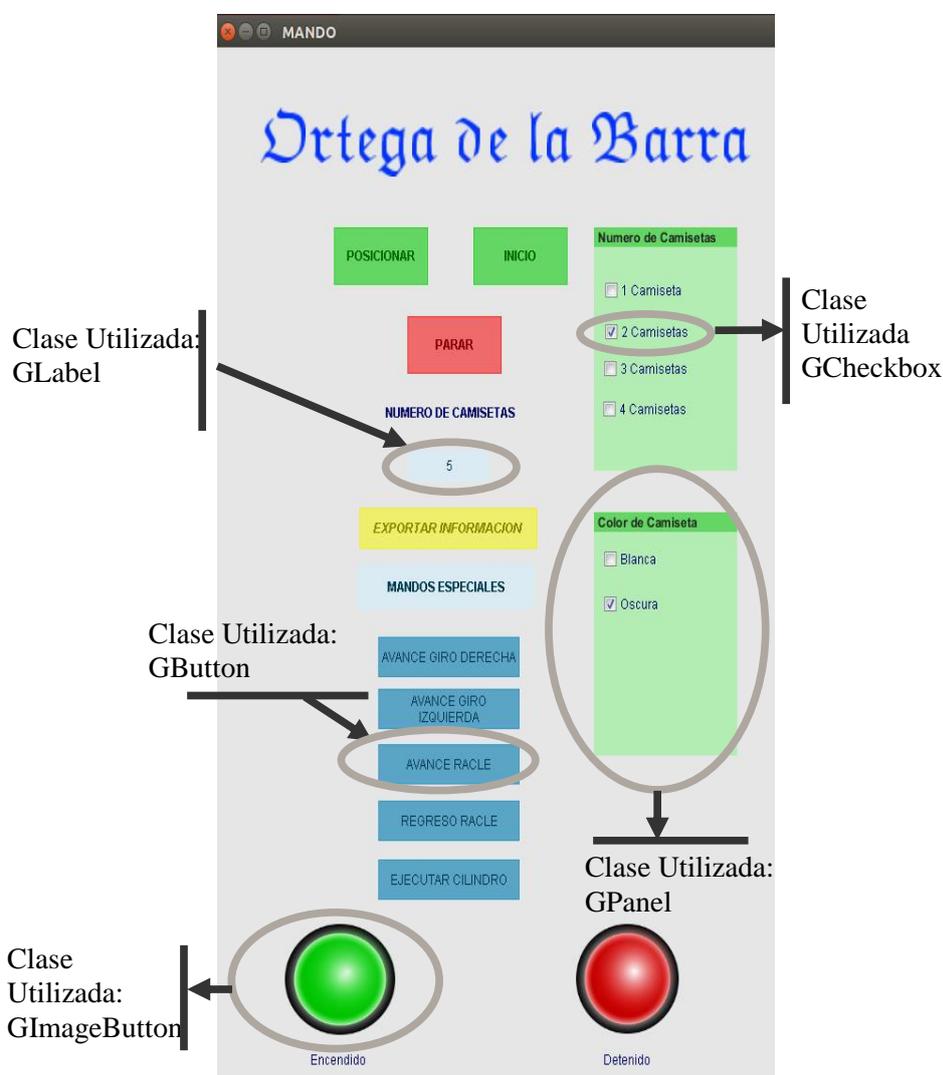


Figura 109 Clases utilizadas en la ventana de mando

//Se declaran los objetos que se utilizaran para cada clase de la ventana de mando.

GWindow window1; //Objeto que se declara para crear la nueva ventana de mando.

GButton button2; //Objeto que se declara para crear el botón de posicionar.

GButton button3; //Objeto que se declara para crear el botón de inicio.

GButton button4; //Objeto que se declara para crear el botón de paro.

GLabel label4; //Objeto que se declara para visualizar el texto “Numero de camisetas”.

GLabel label5; //Objeto que se declara para visualizar el número de camisetas impresas.

GButton button5; //Objeto que se declara para crear el botón exportar información.

GLabel label6; //Objeto que se declara para visualizar el texto de “Mandos Especiales”.

GButton button6; //Objeto que se declara para crear el botón de avance giro anti horario.

GButton button7; //Objeto que se declara para crear el botón de Avance giro horario.

GButton button8; //Objeto que se declara para crear el botón de avance racle.

GButton button9; //Objeto que se declara para crear el botón de Regreso racle

GImageButton imgButton1; //Objeto que se declara para visualizar la imagen de luz verde o encendido.

GImageButton imgButton2; //Objeto que se declara para visualizar la imagen de luz roja o apagado.

GLabel label7; //Objeto que se declara para visualizar el texto "Encendido"

GLabel label8; //Objeto que se declara para visualizar el texto "Detenido"

GPanel panel1; //Objeto que se declara para crear el panel de numero de camisetas.

GCheckbox checkbox1; //Objeto que se declara para seleccionar la opción de imprimir 1 camiseta.

GCheckbox checkbox3; //Objeto que se declara para seleccionar la opción de imprimir 3 camisetas.

GCheckbox checkbox4; //Objeto que se declara para seleccionar la opción de imprimir 4 camisetas.

GCheckbox checkbox2; //Objeto que se declara para seleccionar la opción de imprimir 2 camisetas.

GPanel panel2; //Objeto que se declara para crear el panel de color de camisetas.

GCheckbox checkbox5; //Objeto que se declara para crear la opción de imprimir sobre camisetas blancas.

GCheckbox checkbox6; //Objeto que se declara para crear la opción de imprimir sobre camisetas oscuras.

GButton button10; //Objeto que se declara para crear el botón de ejecutar cilindro.

// Se inicializa cada objeto y se le agrega su respectivo atributo.

```
window1 = new GWindow(this, "MANDO", 0, 0, 600, 900, false, JAVA2D);
window1.setActionOnClose(G4P.CLOSE_WINDOW);
window1.addDrawHandler(this, "win_draw1");
```

```
button2 = new GButton(window1.papplet, 128, 156, 100, 50);
button2.setText("POSICIONAR");
button2.setTextBold();
button2.setLocalColorScheme(GCScheme.GREEN_SCHEME);
button2.addEventHandler(this, "button2_click1");
```

```
button3 = new GButton(window1.papplet, 276, 156, 100, 50);
```

```
button3.setText("INICIO");
button3.setTextBold();
button3.setLocalColorScheme(GCScheme.GREEN_SCHEME);
button3.addEventHandler(this, "button3_click1");

button4 = new GButton(window1.papplet, 206, 233, 100, 50);
button4.setText("PARAR");
button4.setTextBold();
button4.setLocalColorScheme(GCScheme.RED_SCHEME);
button4.addEventHandler(this, "button4_click1");

label4 = new GLabel(window1.papplet, 165, 297, 174, 39);
label4.setText("NUMERO DE CAMISETAS");
label4.setTextBold();
label4.setOpaque(false);

label5 = new GLabel(window1.papplet, 207, 348, 86, 29);
label5.setLocalColorScheme(GCScheme.CYAN_SCHEME);
label5.setOpaque(true);
label5.setText("5");

button5 = new GButton(window1.papplet, 155, 399, 189, 36);
button5.setText("EXPORTAR INFORMACION");
button5.setTextBold();
button5.setTextItalic();
button5.setLocalColorScheme(GCScheme.YELLOW_SCHEME);
button5.addEventHandler(this, "button5_click1");

button6 = new GButton(window1.papplet, 175, 511, 150, 35);
button6.setText("AVANCE GIRO DERECHA");
button6.setLocalColorScheme(GCScheme.CYAN_SCHEME);
button6.addEventHandler(this, "button6_click1");
```

```
label6 = new GLabel(window1.papplet, 153, 448, 188, 40);
label6.setText("MANDOS ESPECIALES");
label6.setTextBold();
label6.setLocalColorScheme(GCScheme.CYAN_SCHEME);
label6.setOpaque(true);
```

```
button7 = new GButton(window1.papplet, 175, 556, 150, 35);
button7.setText("AVANCE GIRO IZQUIERDA");
button7.setLocalColorScheme(GCScheme.CYAN_SCHEME);
button7.addEventHandler(this, "button7_click1");
```

```
button8 = new GButton(window1.papplet, 175, 604, 150, 35);
button8.setText("AVANCE RACLE");
button8.setLocalColorScheme(GCScheme.CYAN_SCHEME);
button8.addEventHandler(this, "button8_click1");
```

```
button9 = new GButton(window1.papplet, 175, 653, 150, 35);
button9.setText("REGRESO RACLE");
button9.setLocalColorScheme(GCScheme.CYAN_SCHEME);
button9.addEventHandler(this, "button9_click1");
```

```
imgButton1 = new GImageButton(window1.papplet, 76, 760, 117, 96, new
String[] { "lg-LED-Green.png", "lg-LED-Green.png", "lg-LED-Green.png" } );
imgButton1.addEventHandler(this, "imgButton1_click1");
```

```
imgButton2 = new GImageButton(window1.papplet, 385, 760, 109, 95, new
String[] { "red.png", "red.png", "red.png" } );
imgButton2.addEventHandler(this, "imgButton2_click1");
```

```
label7 = new GLabel(window1.papplet, 92, 868, 80, 20);
label7.setText("Encendido");
```

```
label7.setOpaque(false);
```

```
label8 = new GLabel(window1.papplet, 399, 868, 80, 20);
```

```
label8.setText("Detenido");
```

```
label8.setOpaque(false);
```

```
panel1 = new GPanel(window1.papplet, 404, 156, 152, 211, "Numero de  
Camisetas");
```

```
panel1.setText("Numero de Camisetas");
```

```
panel1.setTextBold();
```

```
panel1.setLocalColorScheme(GCScheme.GREEN_SCHEME);
```

```
panel1.setOpaque(true);
```

```
panel1.addEventHandler(this, "panel1_Click1");
```

```
checkbox1 = new GCheckbox(window1.papplet, 10, 45, 120, 20);
```

```
checkbox1.setTextAlign(GAlign.LEFT, GAlign.MIDDLE);
```

```
checkbox1.setText("1 Camiseta");
```

```
checkbox1.setOpaque(false);
```

```
checkbox1.addEventHandler(this, "checkbox1_clicked1");
```

```
checkbox3 = new GCheckbox(window1.papplet, 9, 113, 120, 20);
```

```
checkbox3.setTextAlign(GAlign.LEFT, GAlign.MIDDLE);
```

```
checkbox3.setText("3 Camisetas");
```

```
checkbox3.setOpaque(false);
```

```
checkbox3.addEventHandler(this, "checkbox3_clicked1");
```

```
checkbox4 = new GCheckbox(window1.papplet, 8, 148, 120, 20);
```

```
checkbox4.setTextAlign(GAlign.LEFT, GAlign.MIDDLE);
```

```
checkbox4.setText("4 Camisetas");
```

```
checkbox4.setOpaque(false);
```

```
checkbox4.addEventHandler(this, "checkbox4_clicked1");
```

```
checkbox2 = new GCheckbox(window1.papplet, 10, 81, 120, 20);
```

```
checkbox2.setTextAlign(GAlign.LEFT, GAlign.MIDDLE);
checkbox2.setText("2 Camisetas");
checkbox2.setOpaque(false);
checkbox2.addEventHandler(this, "checkbox2_clicked1");
```

```
panel1.addControl(checkbox1);
panel1.addControl(checkbox3);
panel1.addControl(checkbox4);
panel1.addControl(checkbox2);
```

```
panel2 = new GPanel(window1.papplet, 404, 403, 152, 211, "Color de
Camiseta");
```

```
panel2.setText("Color de Camiseta");
panel2.setTextBold();
panel2.setLocalColorScheme(GCScheme.GREEN_SCHEME);
panel2.setOpaque(true);
panel2.addEventHandler(this, "panel2_Click1");
```

```
checkbox5 = new GCheckbox(window1.papplet, 9, 70, 120, 20);
checkbox5.setTextAlign(GAlign.LEFT, GAlign.MIDDLE);
checkbox5.setText("Oscura");
checkbox5.setOpaque(false);
checkbox5.addEventHandler(this, "checkbox5_clicked1");
```

```
checkbox6 = new GCheckbox(window1.papplet, 9, 31, 120, 20);
checkbox6.setTextAlign(GAlign.LEFT, GAlign.MIDDLE);
checkbox6.setText("Blanca");
checkbox6.setOpaque(false);
checkbox6.addEventHandler(this, "checkbox6_clicked1");
```

```
panel2.addControl(checkbox5);
panel2.addControl(checkbox6);
```

```

button10 = new GButton(window1.papplet, 175, 704, 150, 35);
button10.setText("EJECUTAR CILINDRO");
button10.setLocalColorScheme(GCScheme.CYAN_SCHEME);
button10.addEventHandler(this, "button10_click1");

```

// Función de eventos del botón de “posicionar” para posicionar los brazos giratorios y el racle en el inicio.

```

public void button2_click1(GButton source, GEvent event) {
    println("button2 - GButton >> GEvent." + event + " @ " + millis());

    if(event==GEvent.CLICKED){
    posicionarMaquina();}

```

// Función de eventos del botón de “inicio” para empezar la impresión de camisetas.

```

int completo=0;
int camstImp=0;    //Contador de camisetas impresas

public void button3_click1(GButton source, GEvent event) {
//_CODE_:button3:661011:
    println("button3 - GButton >> GEvent." + event + " @ " + millis());
    if(event==GEvent.CLICKED){
        if (checkbox1.isSelected()){
            InicioParaUnaCamiseta();
            if(0<port.available()){
                completo=port.read();
                if(completo==1){
                    camstImp=camstImp+1;
                    output.println(camstImp);

```

```
    }  
  }  
  completo=0;  
  }  
  if(checkbox2.isSelected()){  
  InicioParaDosCamisetas();  
    if(0<port.available()){  
      completo=port.read();  
      if(completo==1){  
        camstImp=camstImp+2;  
        output.println(camstImp);  
      }  
    }  
  completo=0;  
}  
if(checkbox3.isSelected()){  
InicioParaTresCamisetas();  
if(0<port.available()){  
completo=port.read();  
if(completo==1){  
camstImp=camstImp+3;  
output.println(camstImp);  
}  
}  
completo=0;  
}  
if(checkbox4.isSelected()){  
InicioParaCuatroCamisetas();  
if(0<port.available()){  
completo=port.read();  
if(completo==1){  
camstImp=camstImp+4;
```

```

        output.println(camstImp);

    }
}
completo=0;
}
}
}

```

// Función de eventos del botón de “exportar información” para crear el archivo Excel del registro de camisetas impresas.

```

void setup(){
    output= createWriter("data/camisetasImpresas.csv"); //Se crea la
    función para exportar el registro dentro de la carpeta data, en un
    archivo csv.
}

```

```

public void button5_click1(GButton source, GEvent event) {
    println("button5 - GButton >> GEvent." + event + " @ " + millis());
}

```

```

if(event==GEvent.CLICKED){
    output.println(camstImp); //Se imprime el contador de camisetas
    impresas en el archivo csv.
    output.flush();
    output.close();
}
}

```



Figura 110 Ventana de mando completa con visualización de video stream de la máquina serigráfica automatizada

// Función para edición de la ventana de mando para agregar el logotipo y el video stream de la máquina.

```
import processing.video.*;
```

```
Capture cam;
```

```
void setup(){
```

```
cam=new Capture(this);
```

```
cam.start();
```

```
}
```

```
synchronized public void win_draw1(GWinApplet appc, GWinData data) {
```

```
appc.background(230);
```

```
appc.textFont(font);
```

```
appc.fill(0,50,255);
```

```
appc.textSize(64);
appc.text("Ortega de la Barra",50,100);
appc.textFont(font2);
appc.text("Video Stream de la Maquina",850,80);
if(cam.available()){
cam.read();

}
appc.image(cam,700,100);
}
```

CAPÍTULO 4

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS

Para verificar el correcto funcionamiento de la máquina, y poder evidenciar si esta cumple con los requerimientos planteados, se va a desarrollar un protocolo de pruebas, con el propósito de conocer finalmente si la máquina satisface las necesidades del cliente.

El protocolo de pruebas se va a subdividir en 3 áreas de control, las cuales van a permitir observar el desempeño de la máquina serigráfica automatizada, partiendo desde cada uno de sus componentes que son:

- Pruebas mecánicas
- Pruebas eléctricas y electrónicas
- Pruebas de máquina en funcionamiento

El formato que se ha establecido para el protocolo de pruebas mecánicas y electrónicas, para la toma de datos y verificación, es el siguiente:

Tabla 39
Formato para protocolo de pruebas mecánicas y electrónicas

FORMATO DE PRUEBAS		
Lugar:		Responsable de la Prueba:
Fecha:		
Máquina:		No. Prueba:
Empresa:		
CONTROL DE CONFORMIDAD		

CONTINÚA

APRUEBA:		NO APRUEBA:	
PARTE	DESCRIPCIÓN	CONFORMIDAD	
OBSERVACIONES:			

4.2. PRUEBAS MECÁNICAS

El protocolo de pruebas mecánicas se ha desarrollado para verificar si la máquina serigráfica automatizada cumple o no con el diseño mecánico planteado. Este protocolo tiene un total de 4 pruebas.

4.2.1. PRUEBA 1: CAPACIDAD DE LA ESTRUCTURA

En la prueba 1, de la capacidad de la estructura, se evaluará por medio de observación que de acuerdo al diseño mecánico, la estructura de la máquina no llegue a deformarse debido a la suma de las cargas de los elementos mecánicos además de una carga operacional.

Aprueba: Si al aplicar las cargas, la estructura de la máquina no se deforma.

No aprueba: Si al aplicar las cargas, la estructura de la máquina patea o se deforma.

4.2.2. PRUEBA 2: CAPACIDAD DE LOS BRAZOS GIRATORIOS

En la prueba 2, se requiere conocer si el brazo giratorio no presenta ningún signo de oposición al movimiento debido al diseño y a las cargas que soporta.

Aprueba: Si los brazos giratorios no producen oposición al movimiento.

No aprueba: Si los brazos giratorios sí presentan oposición al movimiento.

4.2.3. PRUEBA 3: DIENTES DE ENGRANES

En la prueba 3, se requiere evaluar por medio de observación que los dientes de los engranes no presentan imperfecciones y poder descartar una falla temprana de la máquina por desgaste.

Aprueba: Si los dientes de los engranes no presentan imperfecciones.

No aprueba: Si los dientes de los engranes sí presentan imperfecciones.

4.2.4. PRUEBA 4: ACOPLÉ ENTRE EL EJE DEL MOTOR Y EJE DEL HUSILLO DE BOLAS

En la prueba 4, se requiere evaluar por medio de observación que el acople entre la flecha del motor y el eje del husillo de bolas no presenten ninguna señal de falla y que ambos ejes roten con total facilidad, sin deslizarse el uno respecto al otro.

Aprueba: Si no existe deslizamiento entre la flecha del motor y el eje del husillo de bolas.

No aprueba: Si sí existe deslizamiento entre la flecha del motor y el eje del husillo de bolas.

4.2.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS

De acuerdo a las pruebas mecánicas realizadas, adjuntas en el ANEXO 9, se concluye que las 4 pruebas son aprobadas exitosamente con sus respectivas observaciones.

4.3. PRUEBAS ELÉCTRICAS Y ELECTRÓNICAS

El protocolo de pruebas eléctricas y electrónicas se ha establecido para verificar si el prototipo de máquina serigráfica automatizada cumple con las características eléctricas y electrónicas deseadas.

4.3.1. PRUEBA 1: FUNCIONAMIENTO DEL ENCODER INCREMENTAL

En la prueba 1, se requiere conocer si el encoder incremental E6C2-CWZ6C funciona de manera correcta, por lo que se procedió a realizar su respectiva prueba de funcionamiento. A continuación en la tabla 40, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 40
Datos de posición registradas por el encoder incremental

Posición deseada (rad)	Pulsos deseados	Pulsos enviados	Error porcentual (%)
$\frac{1}{4} \pi$	75	73	2,66
$\frac{1}{4} \pi$	75	74	1,33
$\frac{1}{4} \pi$	75	72	4
$\frac{1}{4} \pi$	75	73	2,66
$\frac{1}{2} \pi$	150	146	2,66
$\frac{1}{2} \pi$	150	143	4,66
$\frac{1}{2} \pi$	150	147	2
$\frac{1}{2} \pi$	150	148	1,33
π	300	291	3
π	300	292	2,66
π	300	292	2,66
π	300	294	2
2π	600	589	1,83
2π	600	590	1,6
2π	600	588	2
2π	600	592	1,33

Con lo que se aprueba el funcionamiento del encoder incremental E6C2-CWZ6 mediante los datos obtenidos teniendo un error porcentual no mayor al 5%.

4.3.2. PRUEBA 2: FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR INFRARROJO Y EL MOTOR PARA EL MOVIMIENTO DEL RACLE

En la prueba 2, del funcionamiento del sensor infrarrojo y el motor que realiza el movimiento de racle, se requiere evaluar por medio de observación que el sensor funcione de manera correcta, y el motor cumpla con las características de control para realizar el avance y retroceso del racle.

Aprueba: Si el racle avanza y retrocede hasta la medida programada por el controlador.

No aprueba: Si el racle no avanza y retrocede hasta la medida programada por el controlador.

4.3.3. PRUEBA 3: FUNCIONAMIENTO DE LA VÁLVULA SOLENOIDE

En la prueba 3, se requiere comprobar que la válvula solenoide que permite el accionamiento del cilindro neumático funcione correctamente.

Aprueba: Si la válvula solenoide permite que el cilindro avance y retroceda su vástago por medio de mandos eléctricos.

No aprueba: Si la válvula solenoide no permite que el cilindro avance y retroceda su vástago por medio de mandos eléctricos.

4.3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ELECTRICAS Y ELECTRONICAS.

De acuerdo a las pruebas eléctricas y electrónicas realizadas, adjuntas en el ANEXO 10, se concluye que todas pruebas son aprobadas exitosamente con sus respectivas observaciones.

4.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA

El protocolo de pruebas de funcionamiento de la máquina serigráfica automatizada, se ha establecido para verificar si el prototipo cumple con las necesidades planteadas por el cliente, realiza todos los procesos para la cual fue diseñada, y optimiza los tiempos de producción.

4.4.1. PRUEBA 1: IMPRESIÓN SOBRE CAMISETAS

Dentro de la prueba 1, lo que se quiere saber es que si el número de repeticiones de impresión sobre la misma camiseta influye en la calidad de la imagen impresa. Además de conocer la eficiencia de la máquina serigráfica automatizada.

Tabla 41
Resultados obtenidos de impresiones sobre camisetas claras.

Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
30 seg	1	Baja	60 seg	2	Regular
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
95 seg	3	Alta	61 seg	2	Alta
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
30 seg	1	Regular	61 seg	2	Regular
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
62 seg	2	Alta	29 seg	1	Baja

CONTINÚA 

Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
30 seg	1	Baja	61 seg	2	Baja
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
94 seg	3	Regular	90 seg	3	Alta
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
92 seg	3	Alta	90 seg	3	Alta
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
65 seg	2	Baja	60 seg	2	Regular
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
30 seg	1	Baja	60 seg	2	Regular
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
92 seg	3	Alta	92 seg	3	Alta
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
30 seg	1	Baja	60 seg	2	Regular
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
30 seg	1	Baja	60 seg	2	Regular
Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión	Tiempo de Impresión	Número de repeticiones	Calidad de la impresión
92 seg	3	Alta	92 seg	3	Alta

De acuerdo a los datos obtenidos de 26 camisetas impresas, realizamos la siguiente tabla para relacionar el número de repeticiones con respecto a la calidad de la imagen impresa, de acuerdo a las frecuencias observadas.

Tabla 42
Relación entre el número de repeticiones y la calidad de la impresión

Número de repeticiones	Calidad de la Impresión			Total
	Baja	Regular	Alta	
1	6 (75%)	1 (12.5%)	0 (0%)	7 (26.92%)
2	2 (25%)	6 (75%)	2 (20%)	10 (38.46%)
3	0 (0%)	1 (12.5%)	8 (80%)	9 (34.62%)
Total	8	8	10	26

A partir de la tabla de contingencia anterior, procedemos a plantear nuestras dos hipótesis una nula y otra alternativa, de donde determinaremos cuál es verdadera utilizando el método de chi – cuadrado.

H₀: La calidad de la imagen impresa sobre una camiseta es independiente del número de repeticiones del proceso de impresión sobre la misma.

H₁: La calidad de la imagen impresa sobre una camiseta depende del número de repeticiones del proceso de impresión sobre la misma.

Para calcular todos y cada uno de los valores de la tabla de frecuencias esperadas se utiliza la siguiente expresión.

$$F = \frac{\text{Total Columna(Para dicha celda)} * \text{Total Fila(Para dicha celda)}}{\text{Suma Total}} \quad \text{Ecuación 88}$$

Por lo tanto la tabla de valores esperados es la siguiente:

Tabla 43
Tabla de valores esperados

Número de repeticiones	Calidad de la Impresión			Total
	Baja	Regular	Alta	
1	2,15	2,15	2,69	7,00
2	3,08	3,08	3,85	10,00
3	2,77	2,77	3,46	9,00
Total	8,00	8,00	10,00	26,00

Para resolver la prueba de conjetura planteada definiremos un nivel de significancia del 1%. Para calcular el valor de p utilizamos la siguiente expresión.

$$p = 1 - \text{Nivel de significancia} \quad \text{Ecuación 89}$$

$$p = 1 - 0.01 = 0.99$$

Para calcular el grado de libertad (ν) utilizamos la siguiente expresión.

$$\nu = (\text{Cantidad de filas} - 1) * (\text{Cantidad de columnas} - 1) \quad \text{Ecuación 90}$$

$$\nu = (3 - 1) * (3 - 1)$$

$$\nu = 4$$

Valores críticos de la distribución χ^2 (tema 6.9)

$p = P(X \leq c)$

p	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995
$\nu = 1$	0,00004	0,0002	0,001	0,004	0,016	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,064	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	1,610	9,236	11,070	12,833	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	2,204	10,645	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	2,833	12,017	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,646	2,180	2,733	3,490	13,362	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	4,168	14,684	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	4,865	15,987	18,307	20,483	23,209	25,188
11	2,603	3,053	3,816	4,575	5,578	17,275	19,675	21,920	24,725	26,757
12	3,074	3,571	4,404	5,226	6,304	18,549	21,026	23,337	26,217	28,300
13	3,565	4,107	5,009	5,892	7,042	19,812	22,362	24,736	27,688	29,819
14	4,075	4,660	5,629	6,571	7,790	21,064	23,685	26,119	29,141	31,319
15	4,601	5,229	6,262	7,261	8,547	22,307	24,996	27,488	30,578	32,801
16	5,142	5,812	6,908	7,962	9,312	23,542	26,296	28,845	32,000	34,267

Figura 111 Valores de chi – cuadrado crítico

Fuente: (Spiegel, 1976)

Si el valor del chi – cuadrado calculado es menor o igual que el chi – cuadrado crítico entonces se acepta la hipótesis nula, caso contrario se acepta la hipótesis alternativa.

Visualizando en la figura 111, encontramos que el valor de chi – cuadrado crítico es de 13.277.

De tal manera calculamos el chi – cuadrado con la siguiente fórmula.

$$x_{calc}^2 = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e} \quad \text{Ecuación 91}$$

Donde:

f_o : Frecuencia del valor observado

f_e : Frecuencia del valor esperado

$$x_{calc}^2 = \frac{(6 - 2.15)^2}{2.15} + \frac{(1 - 2.15)^2}{2.15} + \frac{(0 - 2.69)^2}{2.69} + \frac{(2 - 3.08)^2}{3.08} + \frac{(6 - 3.08)^2}{3.08} \\ + \frac{(2 - 3.85)^2}{3.85} + \frac{(0 - 2.77)^2}{2.77} + \frac{(1 - 2.77)^2}{2.77} + \frac{(8 - 3.46)^2}{3.46}$$

$$x_{calc}^2 = 24.06$$

$$x_{calc}^2 > \text{Valor critico}$$

$$24.06 > 13.277$$

Por lo tanto se niega la hipótesis nula, y se acepta la hipótesis alternativa, la cual es “*La calidad de la imagen impresa sobre una camiseta depende del número de repeticiones del proceso de impresión sobre la misma*”. Entonces se recomienda que las impresiones sean en su totalidad con más de una repetición para favorecer a la calidad de la imagen impresa, dependiendo además de la cantidad de tinta que se provea.

4.4.2. PRUEBA 2: FUNCIONAMIENTO DEL HMI

En la prueba de funcionamiento del HMI se realizó las siguientes observaciones:

- La pantalla despliega los botones e íconos idóneos para que el usuario pueda manipular la máquina fácilmente.
- La ventana de acceso funciona correctamente, diferenciando el administrador de los operarios.
- La exportación de los registros de impresiones funciona correctamente, permitiendo exportar la información a Excel.
- El botón de paro de emergencia desactiva de manera inmediata todas las funciones de la máquina.
- El video stream de la máquina se logra visualizar en la pantalla de mando.

Por lo que se aprueba el funcionamiento del HMI, dando a conocer que su diseño sí cumple con lo estipulado.

El prototipo de máquina serigráfica automatizada demostró que cumple correctamente con todas las pruebas realizadas, verificando de tal manera que el diseño y construcción de la máquina han sido muy bien desarrollados, dando como resultado una máquina serigráfica automatizada eficiente para realizar el trabajo para la que fue implementada.

4.4.3. FUNCIONAMIENTO DE LA IMPRESIÓN POR ETAPAS

1. Colocamos la camiseta sobre la base de uno de los cuatro brazos giratorios.



Figura 112 Colocación de la camiseta sobre la base

2. Acoplamos el marco serigráfico con el sujetador de marcos sobre el brazo giratorio.



Figura 113 Acople de la malla serigráfica

3. Colocamos la tinta para serigrafía al extremo del marco serigráfico



Figura 114 Colocación de la tinta para serigrafía

4. Posicionamos el brazo giratorio alineado al brazo de impresión.



Figura 115 Posicionamiento del brazo giratorio

5. Llevamos el racle a su posición inicial

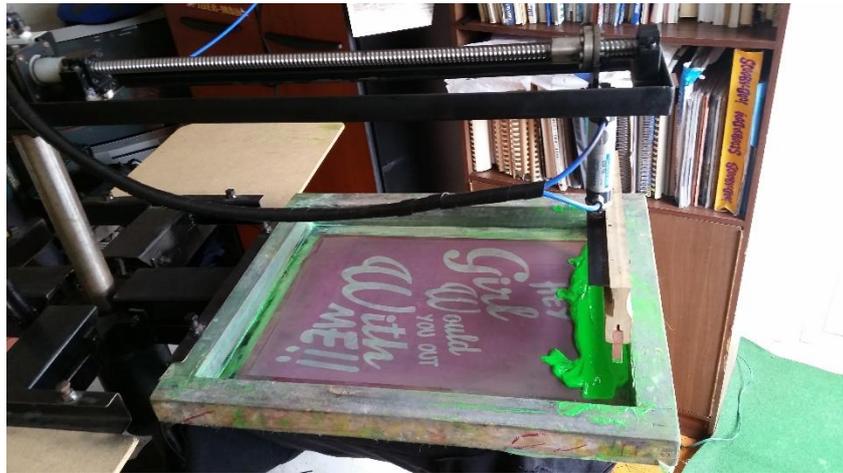


Figura 116 Posicionamiento del racle a su posición inicial

6. Realizamos la inundación de la tinta sobre todo el marco serigráfico con el cilindro neumático a baja presión.

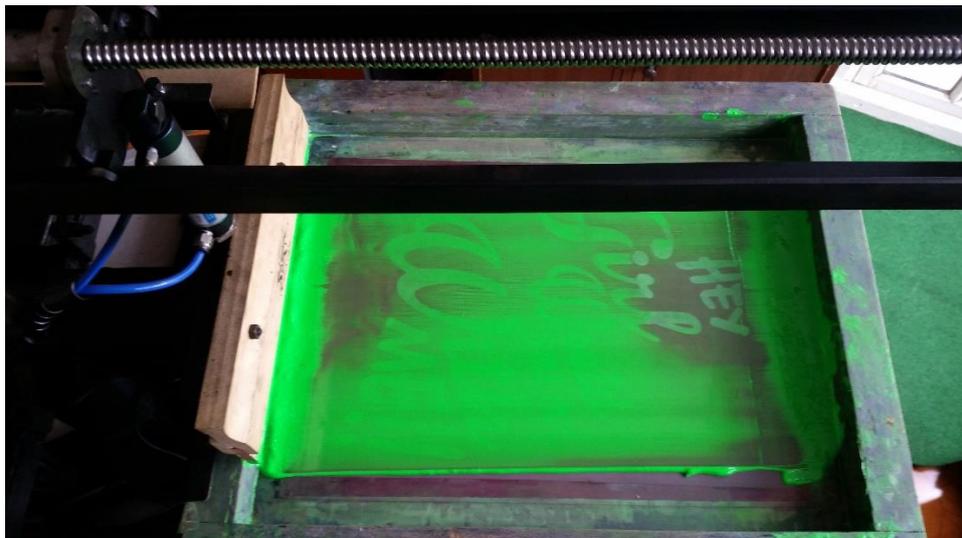


Figura 117 Inundación de tinta sobre el marco por medio del racle

7. Retornamos el racle de impresión a su posición y aumentamos la presión del cilindro neumático.

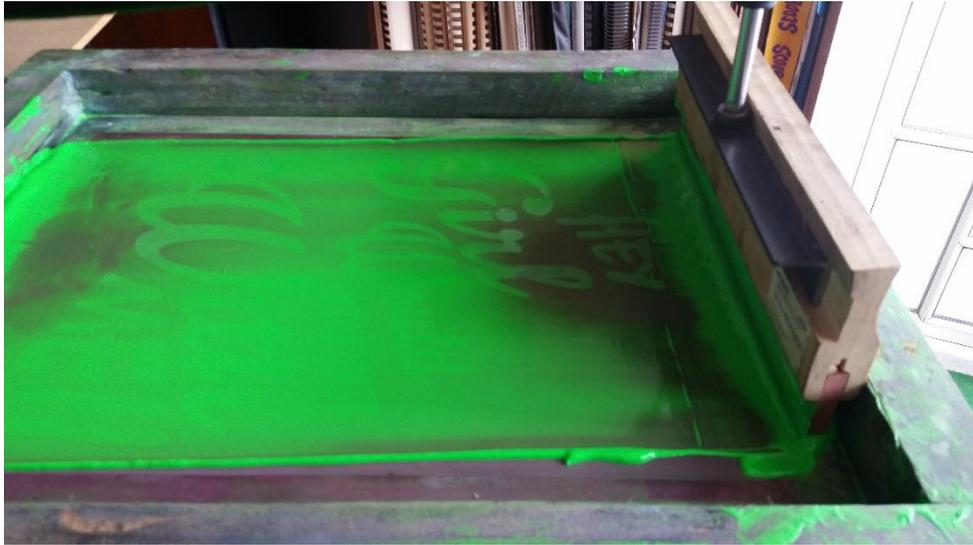


Figura 118 Retorno de racle después de la inundación de tinta



Figura 119 Aumento de presión a 2 bares

8. Ejecutamos la impresión automática con el número de repeticiones requeridas.



Figura 120 Impresión automática de ida

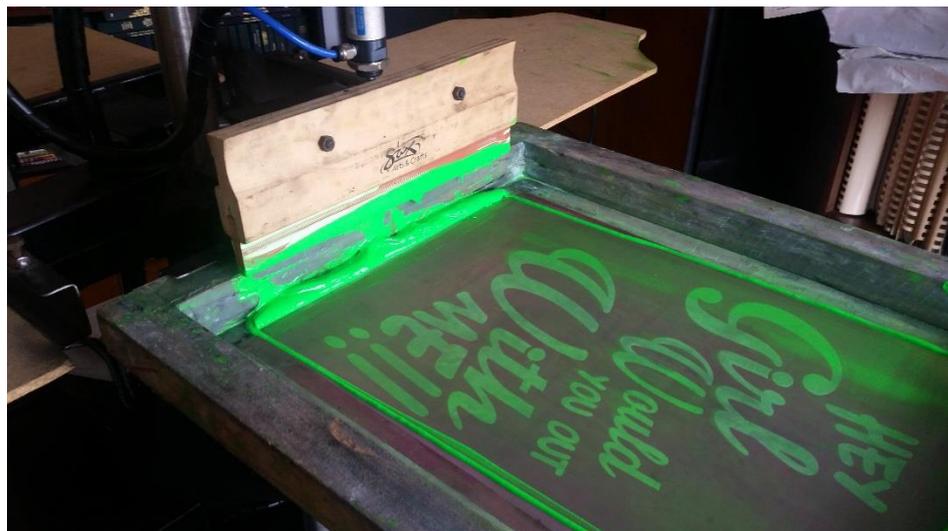


Figura 121 Retorno del vástago del cilindro neumático

9. Obtenemos nuestro producto final y lo dejamos secar.



Figura 122 Camiseta impresa

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS DE COSTOS

5.1 COSTOS DE MATERIA PRIMA

A continuación en la tabla 44 se detallan los costos de materia prima utilizados para la construcción del prototipo de estación de máquina serigráfica automatizada.

Tabla 44
Costos de Materia Prima

No	Material	Especificación	Costo (USD/m)	Costo (USD/u)	Peso (Kg)	Cant	Subtotal (USD)
1	Acero AISI 4340	Varilla d=120 mm y longitud 100 mm	112,32	N/A	0,82	0,1	11,23
2	Acero AISI 4340	Varilla d=120 mm y longitud 150 m	112,32	N/A	5,10	0,15	16,85
3	Acero AISI 4340	Varilla d=50 mm y longitud 100 mm	103,35	N/A	0,21	0,1	10,335
4	Acero A36	Tubo Rectangular 80 x 40 x 3,2 mm	4,45	N/A	12,35	6	26,70
5	Aleación de aluminio 1060	Varilla d=50 mm y longitud 280 mm	67,8	N/A	2,35	0,28	18,98
6	Acero A36	Plancha 850 x 160 x 5 mm	5,45	N/A	1,04	1	5,45
7	Acero A36	Varilla d=45 mm y longitud 280mm	22,32	N/A	2,45	0,28	6,25

CONTINÚA →

8	Rodamiento	Rodamiento #6308 d=40 mm	N/A	28,65	N/A	1	28,65
9	Tornillo 3/8"	3/8"-16 x 1.1/4", cabeza hexagonal	N/A	0,18	N/A	12	2,16
10	Tornillo 3/8"	3/8"-16 x 1.3/4", cabeza hexagonal	N/A	0,33	N/A	8	2,64
11	Tuerca 3/8"	Tuerca Hexagonal Grado 5	N/A	0,07	N/A	20	1,40
12	Plancha de Madera Triplex	100 x 100 cm espesor de 10 mm	N/A	28,35	N/A	1	28,35
13	Ángulos	Longitud 250 mm espesor 2 mm	N/A	3,59	N/A	4	14,36
TOTAL:							173,36

5.2 COSTOS DE HERRAMIENTAS, MATERIALES Y EQUIPOS

El costo de las herramientas menores empleadas en el proceso de construcción de la maquina se pueden observar en la tabla 45.

Tabla 45
Costo de herramientas menores de la máquina

No	Ítem	Cantidad	Precio Unitario (USD/u)	Subtotal
1	Cautín	1	12,30	12,30
2	Calibrador pie de Rey	1	21,80	21,80
3	Multímetro	1	18,20	18,20
4	Juego de puntas para desarmador	1	12,35	12,35
5	Desarmador de bornera	1	2,15	2,15
6	Corta alambres	1	6,70	6,70
TOTAL:				73,50

En la tabla 46 se detallan los costos de los materiales utilizados para la implementación del prototipo de estación de máquina serigráfica automatizada.

Tabla 46
Costo de materiales de la máquina

No	Ítem	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (USD/u)	Subtotal
1	Sensor Infrarrojo	DIY Sharp GP2Y0A21YK0F	1	18,00	18,00
2	Sensor encoder incremental	E6C2-CWZ6C de Singswise	1	24	24
3	Racle de serigráfica 12"	12 " de goma	1	25,00	25,00
4	Conector de Válvula	1/4" para manguera de 6mm	3	3,42	10,26
5	Silenciador de Válvula	3/8" bronce	2	3,20	6,40
6	PND 1605 Husillo de bolas	700 mm de longitud	1	200,00	200,00
7	PLBU 16	Rodamiento de Apoyo	1	12,00	12,00
8	BUF 16	Rodamiento de Apoyo	1	12,00	12,00
9	Fuente de Poder de 24 V 15 A	X-360-24 15 A	1	35,00	35,00
10	Módulo de 4 canales de relé	Compatibilidad con arduino	1	15,00	15,00
11	Espiral para cableado	d= 12 mm y 10 m de longitud	1	9,60	9,60
12	Cable 18 Awg	3 hilos 5 m de longitud	1	2,80	2,80
				TOTAL:	370,06

En la tabla 47 se detallan los costos de los equipos empleados para la elaboración y funcionamiento del prototipo de estación de máquina serigráfica automatizada.

Tabla 47
Costo de equipos del prototipo de máquina serigráfica automatizada

No	Ítem	Descripción	Cant	Precio Unitario (USD/u)	Subtotal
		110 V AC 2 posiciones 5 vías			
1	Válvula mando por Solenoide	4V310 -10	1	20,00	20,00
2	Cilindro Neumático Doble Efecto	Uxcell MAL 25x50	1	35,00	35,00
3	Nema 23 Motor a Pasos Alto Torque	23HS45-4204S	2	100,00	200,00
4	Driver de Motor a Pasos	TB6560 AHQ	2	20,00	40,00
5	Fuente de Poder de 24 V 15 A	X-360-24 15 A	1	35,00	35,00
6	Arduino Mega 2560	Placa basada en el microcontrolador ATMEGA 2560	1	28,70	28,70
7	Compresor neumático	Shimaha Modelo W 2006 A	1	100,00	100,00
				TOTAL:	458,70

5.3 COSTOS DE MANO DE OBRA

Los costos de mano de obra empleada para la manufacturación del prototipo de estación de máquina serigráfica automatizada, se detallan en la tabla 48.

Tabla 48
Costos de Mano de Obra

No	Operación	Descripción	Costo (USD/h)	Tiempo (h)	Subtotal
1	Fresado	Elaboración engrane de 48 dientes	42,00	2,0	84,00
2	Fresado	Elaboración engrane de 112 dientes	42,00	2,5	105,00
3	Torneado	Elaboración de la base cilíndrica	33,00	2,5	82,50

CONTINÚA →

4	Corte y limado	Elaboración del soporte del brazo de impresión	26,00	0,5	13,00
5	Corte y limado	Elaboración del brazo de impresión	26,00	1,5	39,00
6	Soldado	Fijación de los componentes del brazo de impresión	32,00	1,0	32,00
6	Torneado	Elaboración del enroscamiento entre soporte y base	33,00	2,0	66,00
7	Corte y limado	Elaboración de los brazos giratorios	26,00	1,5	39,00
8	Corte y limado	Elaboración de la base de tres patas	26,00	1,0	26,00
9	Perforado	Elaboración de agujeros de sujeción	21,00	1,5	31,50
10	Soldado	Unión de los brazos giratorios	32,00	1,5	48,00
11	Soldado	Unión de la base de tres patas	32,00	1,5	48,00
12	Pintado	Pintado para evitar la corrosión	20,00	2,5	50,00
				TOTAL:	664,00

5.4 COSTO TOTAL

El costo total del prototipo de estación de máquina serigráfica automatizada, se especifica en la tabla 49.

Tabla 49
Costo total del prototipo de máquina serigráfica automatizada

DETALLE	COSTO (USD)
COSTO DE MATERIA PRIMA	173,36
COSTO DE HERRAMIENTAS	73,50
COSTO DE MATERIALES	370,06
COSTO DE EQUIPOS	458,70
COSTO DE MANO DE OBRA	664,00
COSTO TOTAL	1739,62

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se comprobó notablemente que mediante un buen diseño mecatrónico se pudo generar un prototipo de estación de máquina serigráfica automatizada versátil, con la capacidad de cumplir las funciones de cualquier máquina serigráfica manual común con un valor agregado de autonomía y control de producción.
- La interfaz gráfica humano – máquina (HMI) implementada, logró ser bien amigable con los usuarios y fácil de usar gracias a las ventanas de ayuda que posee. De tal manera los administradores y operadores se sintieron muy satisfactorios al interactuar con la máquina, mejorando su ánimo, además que lograron dar un paso adelante hacia la nueva tendencia industrial de trabajar con máquinas mecatrónicas.
- El stepper driver TB6560 de Toshiba utilizado es un dispositivo de última tecnología en el mercado, para el control de motores paso a paso de alto voltajes. A diferencia de otros drivers, este consta de principalmente dos pines de entrada, uno para el sentido de giro del motor (horario o anti horario), y otro que transforma los trenes de pulsos que recibe en los pasos que rotará la flecha del motor. Además que cuenta con un circuito basado de switches para configurar la señal amplificada en un máximo de 3.5 amperios, entregando un mayor torque al motor.
- La distancia de paso del husillo de bolas fue un valor estrictamente analizado para la implementación del sistema de avance y retroceso del racle, puesto que a menor sea la distancia de paso mejor será la resolución del racle y mayor será la exactitud. De esta manera el husillo

de bolas que se empleo fue de un paso de 5 milímetros, es decir que por cada giro entero del eje la tuerca avanzaba esta distancia, factor que facilitó de gran manera el control del sistema de impresión y con la posibilidad de posicionar el racle a milímetros del comienzo y final del marco serigráfico con muy bajo error.

- El número de dientes del engrane acoplado al eje de los brazos giratorios es proporcional a la mejora de la resolución de posicionamiento de cada brazo que transporta una camiseta, es decir mientras más dientes tenga el engrane menor será el error de posicionamiento o mayor será su exactitud. Por tal motivo es que el engrane fue construido con un módulo de 1 para obtener el mayor número de dientes posibles con el diámetro primitivo planteado, sin invertir mucho dinero.

6.2. RECOMENDACIONES

- Para la comunicación entre el computador y la tarjeta arduino Mega 2560 se recomienda utilizar un ordenador que funcione con un sistema operativo con procesamiento rápido, es decir uno que no consuma demasiados recursos al procesador de la máquina como para volverlo lento, una gran elección es Linux. De esta manera la comunicación entre los dispositivos sea la más rápida posible permitiendo controlar la máquina en un tiempo casi real.
- Se recomienda nivelar correctamente las bases para camisetas sujetas a los brazos giratorios periódicamente, para que queden totalmente horizontales y formen un ángulo de 90 grados con el racle de impresión, con el fin de asegurar que la camiseta a imprimir entre en contacto con toda la superficie de la goma del racle, y se logre presionar la tinta de forma uniforme en todo el proceso de impresión.

- Gracias a la utilización de hardware abierto y la implementación de arquitectura modular para el desarrollo del prototipo de estación de máquina serigráfica automatizada, es que se podrá fácilmente actualizar e incrementar las funciones y aplicaciones de la máquina mediante el añadido de sensores y actuadores; un claro ejemplo es añadir más brazos impresores a la máquina. O a su vez añadir más hardware abierto además del arduino, como un raspberry pi, entre otros; los cuales permiten agregar una extensa cantidad de aplicaciones a la máquina de las cuales van desde la utilización de visión artificial para detectar imperfecciones en las impresiones, o el color de la camiseta para seleccionar automáticamente el mejor proceso de impresión; hasta conectar a la máquina a un servidor web, donde el administrador pueda controlarla y monitorearla desde cualquier parte, ya sea dentro de la empresa o en cualquier otro lugar, desarrollando lo que hoy en día se llama el internet de las cosas.

BIBLIOGRAFÍA

AliExpress. (14 de Diciembre de 2015). *IR-Distance-sensor-GP2Y0A21YK0-Measuring-Detecting-distance-10-80CM-with-cabl.* Obtenido de <http://es.aliexpress.com/>: <http://es.aliexpress.com/item/New-1pcs-IR-Distance-sensor-GP2Y0A21YK0-Measuring-Detecting-distance-10-80CM-with-cable/1505578062.html>

Amazon. (29 de Octubre de 2015). *SainSmart-Router-Single-Stepper-Stepping.* Obtenido de [amazon.com](http://www.amazon.com/): http://www.amazon.com/SainSmart-Router-Single-Stepper-Stepping/dp/B0093Y88SK?ie=UTF8&psc=1&redirect=true&ref_=oh_aui_detailpage_o07_s02

Amazon. (2 de Noviembre de 2015). *Signswise-Incremental-Encoder-Dc5-24v-Voltage.* Obtenido de [amazon.com](http://www.amazon.com/): http://www.amazon.com/Signswise-Incremental-Encoder-Dc5-24v-Voltage/dp/B00UTIFCVA?ie=UTF8&psc=1&redirect=true&ref_=oh_aui_detailpage_o03_s00

Amazon. (29 de Octubre de 2015). *Switching-Transformer-Regulated-Computer-Project.* Obtenido de [amazon.com](http://www.amazon.com/): http://www.amazon.com/Switching-Transformer-Regulated-Computer-Project/dp/B00ANFJ26U?ie=UTF8&psc=1&redirect=true&ref_=oh_aui_detailpage_o07_s00

Amazon. (10 de Enero de 2016). *Uxcell-Double-Action-Pneumatic-Cylinder.* Obtenido de [Amazon.com](http://www.amazon.com/): http://www.amazon.com/uxcell-Double-Action-Pneumatic-Cylinder/dp/B007Q83KGA?ie=UTF8&psc=1&redirect=true&ref_=oh_aui_detailpage_o05_s00

- Beer, F. P., Russell Johnston, J., Dewolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2009). *Mecánica de Materiales*. México D.F.: Mc Graw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México D.F.: Mc Graw - Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V. .
- Domínguez, K. (26 de Mayo de 2013). *Serigrafía*. Obtenido de Blogspot: http://karendominguez123.blogspot.com/2013/05/serigrafia_26.html
- Electrónica Unicrom. (10 de Marzo de 2016). *proteccion-de-reguladores-de-voltaje*. Obtenido de unicrom.com: <http://unicrom.com/proteccion-de-reguladores-de-voltaje/>
- Escalera, M., & Rodríguez, A. (10 de Noviembre de 2010). *Actuadores Neumáticos*. Obtenido de Universidad de Huelva: <http://www.uhu.es/rafael.sanchez/ingenieriamaquinas/carpetaapuntes.htm/Trabajos%20IM%202009-10/Manuel%20Jesus%20Esacalera-Antonio%20Rodriguez-Actuadores%20Neumaticos.pdf>
- Faine, B. (1991). *Nueva Guía de Serigrafía*. México DF: EDITORIAL DIANA, S.A. DE C.V.
- Gallus Group. (Junio de 2013). *Factores que afectan a la impresión serigráfica*. Obtenido de Gallus In Touch: http://www.gallus-group.com/es/desktopdefault.aspx/tabid-376/575_read-1793/
- Grupo SKF. (2013). *Husillo de bolas laminados de precisión*. SKF marca registrada.

Guinea-Edeso, b. (16 de Febrero de 2012). *Guinea-Edeso.blogspot.com*.
Obtenido de <http://guinea-edeso.blogspot.com/2012/02/ejemplos-de-control-en-lazo-cerrado.html>

Hernandez, J. (30 de Marzo de 2015). *Tensado en serigrafía, tensado de marcos*. Obtenido de Crocetex: <http://crocetex.com/serigrafia/37-where-did-the-mambots-go>

Hobby Components. (10 de Febrero de 2014). *249-tb65603a-single-axis-stepper-motor-driver-board*. Obtenido de hobbycomponents.com: <http://hobbycomponents.com/modules/249-tb65603a-single-axis-stepper-motor-driver-board>

Libertaria, S. (10 de Noviembre de 2012). *Materiales Necesarios | Serigrafía Libertaria*. Obtenido de Serigrafía Libertaria: <http://www.serigrafialibertaria.es/materiales-necesarios/>

M&RCompanies. (20 de Enero de 2013). *Estampadora automática para serigrafía Gauntlet | M&R*. Obtenido de Equipo automático para serigrafía, Máquinas para serigrafía, : <http://www.mrprint.com/es/Equipo%20para%20serigraf%C3%ADa%20%20textil/Estampadoras/High-Performance%20Automatic%20Presses/GAUNTLET%20III%20Automatic%20Screen%20Printing%20Press>

Mercado Libre. (20 de Marzo de 2016). *Compresor-de-Banda*. Obtenido de Mercado Libre.com: http://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-408757049-compresor-de-banda-34-hp-40-litros-115-psi-110-v-_JM

Mott, R. (2006). *Diseño De Elementos De Máquinas*. Naucalpan de Juárez, Edo. de México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Norton, R. L. (2011). *Diseño De Máquinas Un enfoque integrado*. Naucalpan de Juárez, Estado de México: Pearson Educación.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson Educación.

OMC Stepperonline. (30 de Enero de 2016). *High Torque Nema 23 CNC Stepper Motor 113mm 3Nm(425oz.in) 23HS45-4204S* . Obtenido de omc-stepperonline.com: <http://www.omc-stepperonline.com/high-torque-nema-23-cnc-stepper-motor-113mm-3nm425ozin-23hs454204s-p-127.html>

Puangdownreong, D. (2013). Current Search: Performance Evaluation and Application to DC Motor Speed Control System Design. *Intelligent Control and Automation*, 42-54.

Reas, C., & Fry, B. (2014). *Processing: A Programming Handbook for Visual Designers*. Boston: The MIT Press.

SKF Group. (31 de Enero de 2015). *SKF Bearing Calculator*. Obtenido de SKF.com: <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/selectProduct.action>

Spiegel, M. R. (1976). *Teoría y Problemas de Probabilidad y Estadística*. Naucalpan de Juárez, Edo. de México: Libros McGraw - Hill de México, S.A. de C.V.

Tyler, D. (2014). *Silk Screen*. Niles, Michigan: Holy Kow Press.

Zuccarelli, A. (3 de Enero de 2013). *Curso Básico de Serigrafía*. Obtenido de SlideShare: <http://es.slideshare.net/churoaz/curso-bsico-de-serigrafia>